

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет Інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра Автоматики та управління в технічних системах

«До захисту допущено»

Завідувач кафедру

_____ Ролік О. І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
на тему: «Оптимальні за витратою енергії системи керування рухомими
об'єктами»

Виконав: студент 6-го курсу, групи _____ ІА-82мп
(шифр групи)

_____ Головатенко Ілля Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н, доцент каф. АУТС, Писаренко А. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет _____ інформатики та обчислювальної техніки
(повна назва)

Кафедра _____ автоматики та управління в технічних системах
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою

Спеціальність _____ 126 Інформаційні технології та системи
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ролік О. І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Головатенку Іллі Анатолійовичу

_____ (прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації «Оптимальні за витратами енергії системи керування
рухомими об'єктами»

науковий керівник дисертації Писаренко Андрій Володимирович, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)
доцент кафедри АУТС

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2019 р. №__

2. Строк подання студентом дисертації: _____

3. Об'єкт дослідження: оптимальні, за витратою енергії, системи
автоматичного керування

4. Предмет дослідження: метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів для слідкуючих систем керування
5. Перелік завдання, які потрібно розробити: огляд стану справ у предметній області, моделювання оптимальних слідкуючих систем, реалізація та експериментальні дослідження слідкуючої системи на базі LEGO NXT
6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу: діаграма компонентів системи, діаграма послідовності роботи системи, блок-схема роботи системи
7. Орієнтовний перелік публікацій: «Winter InfoCom Advanced Solutions 2018», «Східно-Європейський журнал передових технологій» (№ 6 (102).2019)
8. Консультанти розділів дисертації
9. Дата видачі завдання – 02.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Огляд стану справ предметної області	2.09.2019 р.	
2.	Опис та математична модель алгоритмів	14.09.2019 р.	
3.	Огляд теорії оптимального за витратою енергії керування	28.09.2019 р.	
4.	Моделювання оптимальних слідкуючих системи	1.10.2019 р.	
5.	Побудова об'єкту керування моделі простору станів	15.10.2019 р.	
7.	Реалізація слідкуючої системи на базі LEGO NXT	5.11.2019 р.	
8.	Експериментальні дослідження на базі LEGO NXT	10.11.2019 р.	
9.	Розробка стартап – проекту	15.11.2019 р.	
10	Оформлення текстової документації	28.11.2019 р.	

Студент

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(підпис)

Головатенко І. А.

(ініціали, прізвище)

Писаренко А. В.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Головатенко І. А. Оптимальні за витратою енергії системи керування рухомими об'єктами. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.

Робота містить XXX с. тексту, XXX рисунків, XXX таблиці, XXX літературних джерел та XXX додатки.

З огляду на швидкі темпи розвитку електричних транспортних засобів та проблеми, пов'язані із малим запасом ходу останніх, актуальним є розробка оптимальної, за витратами енергії, системи керування, що дозволить зменшити енергетичні витрати та, як наслідок, збільшити запас ходу.

Об'єктом розробки є оптимальні, за витратою енергії, системи автоматичного керування.

Метою магістерської дисертації є збільшення запасу ходу транспортних засобів на електричній тязі, за рахунок використання оптимальних, за витратою енергії, систем керування.

Предметом дослідження є метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів для слідкуючих систем керування.

Ключові слова: електромобіль, електричний транспортний засіб, оптимізація використання енергії, слідкуюча система, спостерігаючий пристрій, критерій оптимальності за енергією.

ABSTRACT

Holovatenko I. Energy-efficient control systems for moving objects. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2018.

The work contains XXX p. of text, XXX images, XXX tables, XXX references and XXX additions.

Given the rapid pace of development of electric vehicles and the problems associated with the range limitation of it, it is urgent to develop an optimal, energy-efficient control system that will reduce energy costs and, consequently, increase the range limitation.

The object of development is an optimal, energy-efficient automatic control systems.

The aim of the master's thesis is to increase the range limitation of electric vehicles by using energy-efficient control system.

The subject of the study is the method of analytical design of optimal regulators for tracking control systems.

Keywords: electric vehicle, energy optimization, tracking system, trace device, energy optimality criterion.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
1 ОГЛЯД СТАНУ СПРАВ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	11
2 ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ВИТРАТОЮ ЕНЕРГІЇ КЕРУВАННЯ	15
2.1 Задача АКОР стабілізації станів системи	19
2.2 Задача АКОР стабілізації виходу системи	23
2.3 Задача АКОР слідкуючої системи.....	25
3 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ	29
3.1 Моделювання слідкуючої системи для аперіодичної ланки другого порядку	30
3.2 Моделювання слідкуючої системи для консервативної ланки	39
3.3 Моделювання слідкуючої системи на базі коливальної ланки	48
3.4 Висновки	57
4 ПОБУДОВА ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ МОДЕЛІ ПРОСТОРУ СТАНІВ	58
4.1 Отримання даних для ідентифікації моделі робота.....	62
4.2 Побудова моделі системи у просторі станів	65
5 РЕАЛІЗАЦІЯ СЛІДКУЮЧОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ LEGO NXT	70
5.1 Веб-додаток формування маршруту	70
5.2 Алгоритм конвертації довготи-широти у заданий вхідний вплив системи	72
5.3 Експериментальні дослідження на базі LEGO NXT	75
5.3.1 Оптимальна слідкуюча система на базі векторно-матричної моделі регулятора із невідомим вектором станів.....	77
5.3.2 Слідкуюча система на базі ПІД-регулятора.....	80

5.3.3	Слідкуюча система на базі модального регулятора	81
5.4	Висновки	84
6	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	85
6.1	Опис ідеї стартап-проекту	85
6.2	Технологічний аудит ідеї проекту	88
6.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	91
6.4	Розроблення ринкової стратегії проекту	102
6.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	106
6.6	Висновки	112
7	ВИСНОВКИ	114
	СПСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	116
	Додаток А – Публікації	119
	Додаток Б – Лістинг коду віддаленого керування	123
	Додаток В – Лістинг MATLAB скрипту, формування функції $z(t)$	126

ВСТУП

Дедалі частіше йде мова про електромашини, так звані електромобілі. Наразі у світі існує величезна екологічна проблема – викиди парникових газів (ПГ). Дані екологічних досліджень показують, що чимала доля забруднення навколишнього довкілля припадає на рухомі транспортні засоби, що працюють на двигунах внутрішнього згоряння (ДВС) [1].

Зрозуміло, що автоконцерни роблять усе можливе задля поліпшення ситуації, шляхом модифікації своїх двигунів та систем викиду відпрацьованого пального. Однак, вони не можуть звести нанівець згадані викиди.

Оптимальним рішенням є використання такого «пального» для транспортних засобів, яке б дозволило при однакових параметрах, виконувати задачі не гірше сьогоденних аналогів, за одним лишень виключенням – абсолютна відсутність викидів ПГ.

Оптимальною концепцією у світі наразі вважається використання електроенергії, як «пального». Низька собівартість, відсутність забруднюючих викидів, безпечність використання – список можна продовжувати але і цього досить задля того, щоб більш детально звернути увагу на, таку звичну нам, електроенергію.

Актуальність. З огляду на вищесказане, обрана тема дисертації відповідає усім вимогам актуальності. Наукових праць на тему оптимального за витратами енергії управління рухомими об'єктами – ціла низка. Однак, автомобільні гіганти, такі як: Tesla, BMW, Toyota, Chevrolet та ін., хто випускають у своїх модельних рядах електромобілі, все ще не можуть вирішити проблеми із малим запасом ходу.

Описана проблема стала фундаментом для вибору теми магістерської дисертації та дала змогу сформулювати наступні мету і завдання.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської дисертації є збільшення запасу ходу транспортних засобів на електричній тязі, за рахунок використання оптимальних, за витратою енергії, систем керування.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні задачі:

- 1) огляд існуючих підходів;

- 2) аналіз методів синтезу оптимальних систем керування;
- 3) розроблення моделі оптимальних систем керування у пакеті MATLAB;
- 4) дослідження показників оптимальних СК на моделях у пакеті MATLAB;
- 5) створення макету системи та дослідження на ньому її характеристик.

Методи дослідження. Робота буде ґрунтуватися на наступних методах, що використовуються у теорії автоматичного управління:

- 1) методи переходу від фізичного об'єкту до моделі простору станів;
- 2) методи аналітичного конструювання оптимальних регуляторів;
- 3) методи мінімізації критерію оптимальності за енергією;
- 4) принцип максимуму Понтрягіна;
- 5) методи синтезу спостерігаючого пристрою систем n -го порядку;
- 6) методи синтезу векторно-матричних моделі регулятора систем n -го порядку з невідомим вектором станів.

Об'єктом дослідження є – оптимальні, за витратою енергії, системи автоматичного керування.

Предметом дослідження – метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів для слідкуючих систем керування.

Практичне значення отриманих результатів, полягає у збільшенні запасу ходу електричних транспортних засобів, за рахунок оптимальної системи керування.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертації обговорені на VII міжнародній науково-практичній конференції Winter InfoCom Advanced Solutions 2018, м. Київ.

Публікації. За результатами досліджень, опубліковано 2 наукові праці, з них одна у виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus та одна у матеріалах міжнародної науково-практичної конференції (додаток А).

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ДВС	двигун внутрішнього згорання
СК	система керування
АКОР	аналітичне конструювання оптимальних регуляторів
ПГ	парникові гази
ЕТЗ	електричні транспортні засоби
Б-ЕТЗ	електричні транспортні засоби, що працюють на батареях
Г-ЕТЗ	гібридні електричні транспортні засоби
MIMO	принцип опису багатовимірних моделей керування (Multiple Input Multiple Output)
IoT	Internet of Things, Інтернет речей
IT	Інформаційні технології
ARR	Середня норма рентабельності в галузі
ПЗ	програмне забезпечення
QoS	Quality of Services, якість надання послуг
SWOT-аналіз	Аналіз сильних і слабких сторін проекту, можливостей та загроз пов'язаних із реалізацією

1 ОГЛЯД СТАНУ СПРАВ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Транспортна галузь є основою для економічного зростання країни. Однак нинішні машини переважно працюють на двигунах внутрішнього згоряння (ДВС). Це не лише призводить до того, що нація залежить від примх світового ринку нафти; але, що ще важливіше, робить транспортний сектор найбільшим джерелом викидів парникових газів (ПГ).

Через прогнозований дефіцит сирої нафти та нагальну потребу у зменшенні викидів парникових газів все більше національних проектів та ресурсів зараз зосереджуються на формуванні стійкої транспортної системи, яка може вирішити проблеми, пов'язані зі зміною клімату, а також зменшити залежність від нафти. Серед багатьох інноваційних технологій електрифікація пасажирських транспортних засобів вважається багатьма такою, яка може значно зменшити залежність від нафти, ефективніше керувати транспортними засобами та зменшити викиди вуглецю. Електричні транспортні засоби (ЕТЗ) включають як гібридні модулі (Г-ЕТЗ), так і електромобілі, що працюють на батареях (Б-ЕТЗ).

Зазвичай Г-ЕТЗ мають батарею середнього розміру та двигун внутрішнього згоряння, що дозволяє машині споживати електроенергію більшість часу, збільшуючи тим самим строк служби ДВС та всієї машини в цілому.

Б-ЕТЗ повністю залежать від акумулятора і наразі є основною ціллю для високорозвинених країн.

Тепер більш детально про плюси та мінуси впровадження ЕТЗ, як основи новітніх транспортних засобів.

Переваги володіння ЕТЗ напевно перевищують будь-які мінуси – від заощадження грошей, у довгостроковій перспективі, до меншої кількості поїздок на станцію технічного обслуговування.

1) Використання ЕТЗ поліпшує загальний стан екології.

Для багатьох автомобілістів просто розуміння того, що електромобілі зменшують шкідливий вплив на навколишнє середовище – є достатньою підставою для вкладення коштів.

Електромобілі не мають навіть вихлопної системи, тобто вони мають нульові викиди ПГ. А, оскільки, транспортні засоби на ДВС значною мірою сприяють накопиченню парникових газів у земній атмосфері, перехід на електромобіль може суттєво їх зменшити.

2) Електроенергія дешевша, ніж бензин.

Середня ціна на бензин становить 30.75 грн. за 1 літр, що, насправді, не здається великою ціною – допоки не порівнюєш це з тим, що ЕТЗ дають виграш більш ніж у 10 разів від цієї вартості, враховуючи, що електроенергія значно дешевша ніж бензин. Швидше за все, користувач заряджатимете електромобіль у своєму гаражі більшу частину часу, тому встановлення сонячних батарей у домі може заощадити ще більше грошей на рахунках за електроенергію, що дозволить економити як на повсякденному житті, та і на власному ЕТЗ.

3) Менша вартість та частота технічного обслуговування.

Оскільки електромобілі, працюють без використання мастил відпадає потреба у його заміні (або будь-якого іншого технічного обслуговування, пов'язаного з двигунами внутрішнього згорання, з цього приводу). Гальмівна система ЕТЗ зазвичай не зношується так швидко, як у звичайного автомобіля, що призводить до ще більшої економії.

4) ЕТЗ дуже тихі.

ЕТЗ настільки тихі, що здається навіть, що двигун у них просто відсутній. Насправді вони настільки тихі, що багато законодавців запропонували встановлювати на них пристрої, що створювали би штучний шум, задля попередження пішоходів про свою присутність поруч.

5) Отримання податкових пільг.

Власники електромобіля отримують податковий кредит лише за те, що вони допомагають зменшити вплив парникових газів на навколишнє середовище.

6) Скорочення часу поїздки.

У деяких країнах існує так звана смуга для транспортних засобів із високим рівнем завантаження пасажирами [2]. Володіння ЕТЗ – перевага користування цією смугою, навіть без пасажирів.

Недоліки:

1) Більшість ЕТЗ мають досить малий запас ходу.

Хоча ця характеристика ЕТЗ постійно вдосконалюється, вона все ще є однією із головних критеріїв для відмови від звичайного автомобіля. Повна зарядка більшості ЕТЗ дає запас ходу в діапазоні від 100 до 150 км, у той час як тільки невелика частина може похизуватися діапазоном від 300 до 500 км на заряд.

2) Перезарядка може зайняти деякий час.

Порівняно з декількома хвилинами, які потрібні для заправки звичайного автомобіля на АЗС, зарядка ЕТЗ – набагато більш значна втрата у часі. У той час як більшість виробників електродвигунів ставлять планку близько чотирьох годин, для повного заряду, деякі виробники не сильно цим переймаються, що призводить до 15 – 20 годин на повну зарядку.

3) Великі початкові інвестиції.

Ціни на найбільш доступні моделі електричних автомобілів починаються від 30 000 - 40 000 доларів, в той час як за розкішні моделі потрібно буде викласти мінімум 80 000 доларів. Допоки технологічний прогрес у цьому питанні буде стояти на місці та витрати на виробництво ЕТЗ не зменшаться, споживачі можуть розраховувати на ціну від 10 000 до 50 000 доларів та більше.

4) Нерозвинена інфраструктура станцій зарядки.

Наразі дана проблема існує але, з огляду на зростаючу популярність електрокарів, кількість зарядних станцій зростає відповідно.

5) Мала кількість варіативності у виборі моделі ЕТЗ.

Так, електромобілі поступово захоплюють світ, однак не так багато варіантів можуть запропонувати провідні виробники ЕТЗ, тим паче коли мова йде про естетику, особливо в порівнянні з тим, наскільки більше у можливостей до кастомізації звичайних автомобілів (колір, оббивка салону, розмір дисків та їх колір і т.д.).

Прийняття ЕТЗ може зіграти значну роль у вирішенні як енергетичних, так і екологічних криз, спричинених чинною транспортною системою. Оскільки переважна більшість ресурсів виробництва електроенергії є побутовими, електромобілі розглядаються як відмінний спосіб диверсифікувати транспортні види

палива. Незважаючи на те, що деякі проблеми залишаються, у зв'язку з високою вартістю та складністю виготовлення акумуляторних батарей, використання побутової електроенергії для нічної підзарядки – питання вирішене. Крім того, заряджати електромобілі набагато дешевше, ніж заправляти транспортні засоби із ДВС.

По-перше, за середньою національною ціною електроенергії для житла приблизно 1 грн. за 1 кВт * год, транспортний засіб, що працює лише на електриці, може проїхати приблизно 50 км всього за 7 грн. – що майже в десять разів менше ніж витрати на звичайну машину, із двигуном внутрішнього згорання, враховуючи ціну бензину 30 грн. за 1 літр.

По-друге, електроенергія має великий потенціал для скорочення викидів парникових газів. Електромобілі мають нульові викиди, хоча вироблення електроенергії для живлення транспортного засобу, ймовірно, створює забруднення повітря. Використання електромобілів може зменшити викиди ПГ приблизно на 33% порівняно з сьогоdnішніми автомобілями, які працюють на ДВС. Якщо припустити, що до 2050 р. кількість електромобілів зросте до 56%, то загальний відсоток викидів ПГ транспортними засобами буде в межах 26...30%.

Величезні потенційні переваги джерел електроенергії вже викликали значний інтерес та інвестиції в технології ЕТЗ. З кінця 2010 року понад 20 автовиробників представили свої концепти Г-ЕТЗ або Б-ЕТЗ. Не важко помітити, що найближчим часом електричні джерела можуть отримати значне проникнення на ринок, особливо у густонаселених міських районах із системними проблемами якості повітря. Незабаром людство зіткнеться з проблемою підвищення ефективності всієї системи ЕТЗ. Більшість сучасних досліджень у цій галузі орієнтовані на те, як подолати технічні бар'єри, такі як зменшення витрат на виготовлення акумуляторних батарей та проблеми з інфраструктурою станцій підзарядки ЕТЗ. Для подолання цих бар'єрів були спрямовані великі наукові та інвестиційні зусилля.

Однак дуже мало досліджень було зосереджено на тому, як підвищити ефективність всієї системи ЕТЗ.

2 ОПТИМАЛЬНОЕ ЗА ВИТРАТОЮ ЕНЕРГІЇ КЕРУВАННЯ

Нехай дана лінійна система

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \quad (2.1)$$

та функціонал

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t) dt. \quad (2.2)$$

Обмеження на $\mathbf{u}(t)$ немає, T відоме, $\mathbf{R}(t)$ – позитивно визначена матриця.

Гамільтоніан H для даної системи та функціоналу J за принципом максимуму Понтрягіна

$$H = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t) p_0(t) + \mathbf{x}(t)^T \mathbf{A}(t)^T \mathbf{p}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{B}(t)^T \mathbf{p}(t). \quad (2.3)$$

Додаткова вектор-функція $\mathbf{p}(t)$ має наступний вигляд

$$\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ \dots \\ p_{n+1}(t) \end{bmatrix},$$

така що,

$$\mathbf{p}(T) = [-1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T,$$

та знаходиться зі співвідношення

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)}. \quad (2.4)$$

З рівняння (2.4) отримуємо:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = -\mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.5)$$

Оскільки обмеження на величину керування відсутні, можна записати, що

$$\max_{\mathbf{u}} H : \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)} = 0,$$

звідки слідує

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}(t)} = \mathbf{R}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t) = 0, \quad (2.6)$$

Знаходимо оптимальне керування з виразу (2.6):

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.7)$$

Підставляючи (2.7) у (2.1), отримуємо:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.8)$$

Припустимо, що рішення канонічних рівнянь (2.8) та (2.5) пов'язані рівнянням:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t), t \in [t_0, T]. \quad (2.9)$$

Підставимо (2.9) у рівняння (2.1):

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t). \quad (2.10)$$

Диференціюємо вектор-функцію $\mathbf{p}(t)$:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)\dot{\mathbf{x}}(t). \quad (2.11)$$

Та підставляємо (2.10), отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}(t) &= \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)[\mathbf{A}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) = \\ &= [\dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Також, було знайдено у (2.5), що:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = -\mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}(t) = -\mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t). \quad (2.13)$$

Прирівнюючи (2.12) та (2.13), одержимо:

$$[\dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) = 0, \quad (2.14)$$

при будь-якому $t \in [t_0, T]$. Отримане рівняння повинно бути справедливим при будь-яких значеннях $\mathbf{x}(t)$, отже, спрощене рівняння бути мати вигляд:

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t). \quad (2.15)$$

Отримане рівняння (2.15) носить назву рівняння Рікатті, розв'язком якого є симетрична матриця $\mathbf{K}(t)$ розмірності $n \times n$, що задовольняє граничній умові

$$\mathbf{K}(T) = 0.$$

Отже, розв'язуючи рівняння Рікатті та підставляючи розв'язок у:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t)$$

отримуємо вираз для оптимального, за витратами енергії, керування.

2.1 Задача АКОР стабілізації станів системи

Нехай дана лінійна система:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \quad (2.1)$$

та функціонал:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{x}(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t)] dt. \quad (2.2)$$

Обмеження на $\mathbf{u}(t)$ немає, T відоме, \mathbf{F} та $\mathbf{Q}(t)$ – позитивно напіввизначені матриці, $\mathbf{R}(t)$ – позитивно визначена матриця.

Гамільтоніан H для даної системи та функціоналу J за принципом максимуму Понтрягіна:

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{x}(T) + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{x}(t) p_0(t) + \\ & + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t) p_0(t) + \mathbf{x}(t)^T \mathbf{A}(t)^T \mathbf{p}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{B}(t)^T \mathbf{p}(t). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Додаткова вектор-функція $\mathbf{p}(t)$ має наступний вигляд

$$\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ \dots \\ p_{n+1}(t) \end{bmatrix},$$

така що,

$$\mathbf{p}(T) = [-1 \ 0 \ \dots \ 0]^T,$$

та знаходиться зі співвідношення:

$$\square \quad \mathbf{p}(t) = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)}. \quad (2.4)$$

З (2.4) отримуємо:

$$\square \quad \mathbf{p}(t) = -\mathbf{Q}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.5)$$

Оскільки обмеження на величину керування відсутні, можна записати, що:

$$\max_{\mathbf{u}} H : \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)} = 0,$$

звідки слідує:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}(t)} = \mathbf{R}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t) = 0. \quad (2.6)$$

Знаходимо оптимальне керування з (2.6):

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.7)$$

Підставляючи отримане керування (2.7) у рівняння (2.1) отримуємо:

$$\square \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.8)$$

Припустимо, що рішення канонічних рівнянь (2.1) та (2.5) пов'язані рівнянням:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t), t \in [t_0, T]. \quad (2.9)$$

Підставимо цей вираз у (2.1):

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t). \quad (2.10)$$

Диференціюємо вектор-функцію $\mathbf{p}(t)$:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)\dot{\mathbf{x}}(t). \quad (2.11)$$

Та підставляємо рівняння стану (2.10) у (2.11), отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}(t) &= \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)[\mathbf{A}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) = \\ &= [\dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Також, було знайдено у (2.5), що:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}(t) &= -\mathbf{Q}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}(t) = -\mathbf{Q}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) = \\ &= [-\mathbf{Q}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Прирівнюючи рівняння (2.12) та (2.13), одержимо:

$$[\dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{Q}(t)]\mathbf{x}(t) = 0, \quad (2.14)$$

при будь-якому t з $[t_0, T]$. Отримане рівняння повинно бути справедливим при будь-яких значеннях $\mathbf{x}(t)$, отже, спрощене рівняння бути мати вигляд:

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t) - \mathbf{Q}(t), \quad (2.15)$$

Отримане рівняння (2.15) носить назву рівняння Рікатті, розв'язком якого є симетрична матриця $\mathbf{K}(t)$ розміру $n \times n$, що задовольняє граничній умові:

$$\mathbf{K}(T) = \mathbf{F},$$

Отже, розв'язуючи рівняння Рікатті та підставляючи розв'язок у:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t),$$

отримуємо вираз для оптимального керування, що мінімізує заданий функціонал (2.2).

2.2 Задача АКОР стабілізації виходу системи

Розглянемо лінійну систему:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (2.1)$$

та функціонал:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{y}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{y}(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [\mathbf{y}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t)] dt. \quad (2.2)$$

Із (2.1) виразимо:

$$\mathbf{y}^T = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{C}^T(t),$$

та підставимо у (2.2), отримаємо:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(T) \mathbf{C}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{C}(T) \mathbf{x}(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{C}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{C}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t)] dt. \quad (2.3)$$

Порівнюючи (2.3) із (2.3) п. 2.1, легко побачити, що матриці \mathbf{F} та $\mathbf{Q}(t)$ замінені матрицями $\mathbf{C}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{C}(T)$ та $\mathbf{C}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{C}(t)$ відповідно.

Спираючись на отримані раніше вирази, можемо одразу вивести рівняння Рікатті для даної задачі:

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = -\mathbf{K}(t) \mathbf{A}(t) - \mathbf{A}^T(t) \mathbf{K}(t) + \mathbf{K}(t) \mathbf{B}(t) \mathbf{R}^{-1}(t) \mathbf{B}^T(t) \mathbf{K}(t) - \mathbf{C}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{C}(t), \quad (2.4)$$

з граничною умовою:

$$\mathbf{K}(T) = \mathbf{C}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{C}(T). \quad (2.5)$$

Отже, розв'язуючи рівняння Рікатті та підставляючи розв'язок у:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t) \mathbf{B}^T(t) \mathbf{K}(t) \mathbf{x}(t),$$

отримуємо вираз для оптимального керування, що мінімізує заданий функціонал (2.2).

2.3 Задача АКОР слідкуючої системи

Розглянемо лінійну систему:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (2.1)$$

та функціонал:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(T) \mathbf{F} \mathbf{e}(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{e}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t)] dt, \quad (2.2)$$

де

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{z}(t) - \mathbf{y}(t), \quad (2.3)$$

Вектор $\mathbf{z}(t)$ – бажаний вихід. Виразимо похибку як функцію від $\mathbf{z}(t)$ та $\mathbf{x}(t)$:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{z}(t) - \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t). \quad (2.4)$$

Підставимо (2.4) у (2.2), та запишемо Гамільтоніан для системи:

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2} [\mathbf{z}(t) - \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t)]^T \mathbf{Q}(t) [\mathbf{z}(t) - \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t)] + \\ & + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t) p_0(t) + \mathbf{A}(t)^T \mathbf{x}(t)^T \mathbf{p}(t) + \mathbf{B}(t)^T \mathbf{u}(t)^T \mathbf{p}(t). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Додаткова вектор-функція $\mathbf{p}(t)$ має наступний вигляд:

$$\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ \dots \\ p_{n+1}(t) \end{bmatrix},$$

така що,

$$\mathbf{p}(T) = [-1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T,$$

та знаходиться зі співвідношення

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)}. \quad (2.6)$$

Оскільки обмеження на величину керування відсутні, можна записати, що:

$$\max_{\mathbf{u}} H : \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}(t)} = 0,$$

звідки слідує:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}(t)} = \mathbf{R}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t) = 0, \quad (2.7)$$

звідки отримаємо:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.8)$$

Диференціюючи (2.5) отримуємо:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = -\mathbf{C}^T(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{p}(t) + \mathbf{C}^T(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{z}(t). \quad (2.9)$$

Підставимо (2.8) у рівняння (2.1):

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{p}(t). \quad (2.10)$$

Нехай (2.1) та (2.6) пов'язані лінійним рівнянням:

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t), t \in [t_0, T]. \quad (2.11)$$

Підставимо рівняння (2.11) у рівняння (2.1)

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{S}(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{S}(t)\mathbf{g}(t) = \\ &= [\mathbf{A}(t) - \mathbf{S}(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{S}(t)\mathbf{g}(t), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t). \quad (2.13)$$

Диференціюємо вектор-функцію $\mathbf{p}(t)$:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)\dot{\mathbf{x}}(t). \quad (2.14)$$

та підставляємо рівняння (2.1), одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}(t) &= \dot{\mathbf{K}}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)[\mathbf{A}(t) - \mathbf{S}(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{S}(t)\mathbf{g}(t) - \dot{\mathbf{g}}(t) = \\ &= [\dot{\mathbf{K}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{S}(t)\mathbf{K}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{S}(t)\mathbf{g}(t) - \dot{\mathbf{g}}(t), \end{aligned} \quad (2.15)$$

Повернемося до оптимального керування:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)[\mathbf{g}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t)],$$

де $\mathbf{K}(t)$ – дійсна, симетрична, позитивно визначена матриця розмірності $n \times n$ та є рішенням рівняння Ріккаті:

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}^T(t)\mathbf{K}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t) - \mathbf{C}^T(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{C}(t), \quad (2.16)$$

з граничною умовою:

$$\mathbf{K}(T) = \mathbf{C}^T(T)\mathbf{F}\mathbf{C}(T).$$

Вектор $\mathbf{g}(t)$ (з n компонент) є рішення лінійного векторного диференціального рівняння:

$$\dot{\mathbf{g}}(t) = -[\mathbf{A}(t) - \mathbf{B}(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{B}^T(t)\mathbf{K}(t)]^T \mathbf{g}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{z}(t), \quad (2.17)$$

з граничною умовою:

$$\mathbf{g}(T) = \mathbf{C}^T(T)\mathbf{F}\mathbf{z}(T).$$

Розв'язуючи рівняння Ріккаті (2.16) – знайдемо $\mathbf{K}(t)$, а розв'язавши диференціальне рівняння (2.17) у зворотному часі, отримаємо весь вектор $\mathbf{g}(t)$. Підставивши знайдені значення у рівняння $\mathbf{u}(t)$, отримуємо вираз для оптимального керування, що мінімізує заданий функціонал та виконує поставлену задачу слідкування.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ

Даний розділ буде присвячено моделюванню оптимальних слідкуючих систем у пакеті MATLAB/Simulink. Моделювання дасть змогу зрозуміти чи, дійсно, слідкуючі системи можна використовувати для зменшення витрат енергії при оптимальному керуванні.

Також, моделювання – інструмент, котрий дозволяє перевірити ідеї та концепції безпосередньо на моделях, а не на реальних об'єктах. Такий собі метод налагодження, що зводить до мінімуму відсоток вірогідності виходу з ладу реального об'єкту, при подальшому розгортанні на його базі описаної слідкуючої системи.

У рамках даного розділу, автор має на меті розглянути слідкуючі системи для об'єктів керування, представлених наступними моделями:

- 1) аперіодична ланка 2 порядку;
- 2) консервативна ланка;
- 3) коливальна ланка.

Також, доцільно перевірити якісні характеристики перехідних процесів слідкуючої системи для згаданих об'єктів управління, для наступних функцій бажаного виходу $z(t)$:

- 1) $z(t) = \sin(t)$;
- 2) $z(t) = 2t$;
- 3)
$$z(t) = \begin{cases} 4t, & 0 \leq t < 5 \\ 20, & 5 < t \leq 10. \\ 2t, & t > 10 \end{cases}$$

3.1 Моделювання слідкуючої системи для аперіодичної ланки другого порядку

Нехай об'єкт задано наступною передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{5}{4s^2 + 2s + 1}.$$

Перш за все потрібно дізнатися якісні характеристики досліджуваної системи. Для цього доцільно проаналізувати часові характеристики, зокрема – перехідний процес реакції на одиничний стрибок.

На рисунку 3.1 показано графік перехідного процесу системи.

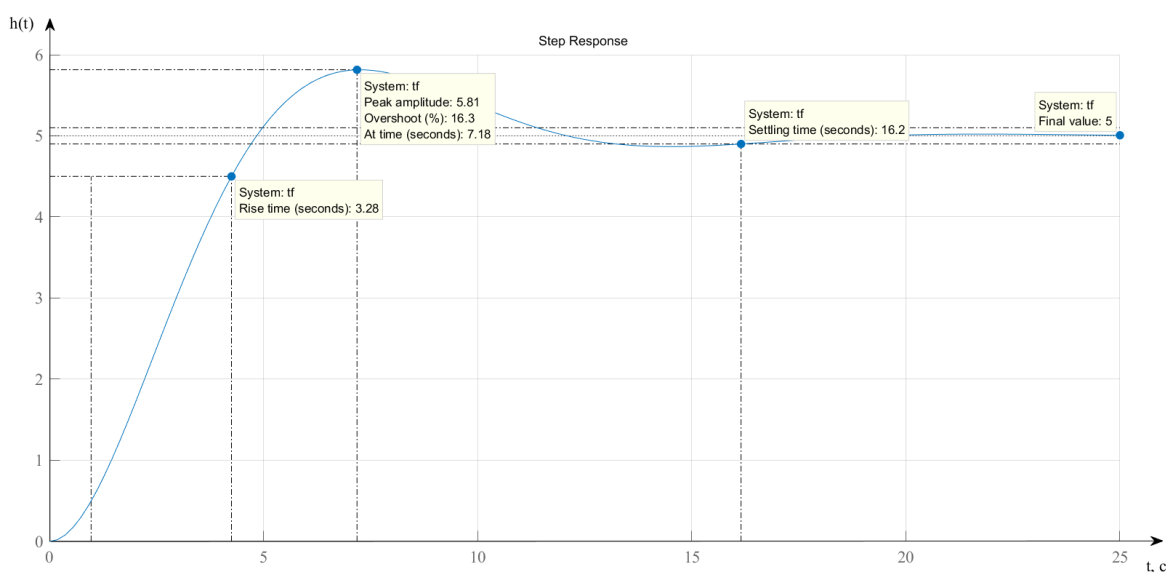


Рисунок 3.1 – Перехідна характеристика аперіодичної ланки

Як видно із рисунку 3.1 обрана система має наступні характеристики:

- 1) усталений час – 3.28 с;
- 2) перерегулювання – 16.3 %;
- 3) час перехідного процесу – 16.2 с;
- 4) усталене значення – 5.

Легко помітити, що обрана аперіодична ланка є стійкою, адже встановлюється у кінцеве значення за певний проміжок часу. Також система має доволі великий запас стійкості, що входить у діапазон від 10...25%. Система має доволі малу швидкодію.

Тепер, перетворимо систему у відповідну модель у просторі станів за допомогою командного рядку MATLAB.

Отримуємо наступний вигляд системи у просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -0.5x_1 - 0.5x_2 + 2u, \\ \dot{x}_2(t) = 0.5x_1, \\ y(t) = 1.25x_2. \end{cases}$$

та, відповідно, матриці **A**, **B**, **C**, **D**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1.25],$$

$$\mathbf{D} = 0.$$

Тепер, коли усі дані про об'єкт зібрані, можна приступати до моделювання сліdkуючої системи для аперіодичної ланки, як об'єкту керування.

На рисунку 3.2 показано базову модель у пакеті MATLAB/Simulink для моделювання сліdkуючої системи.

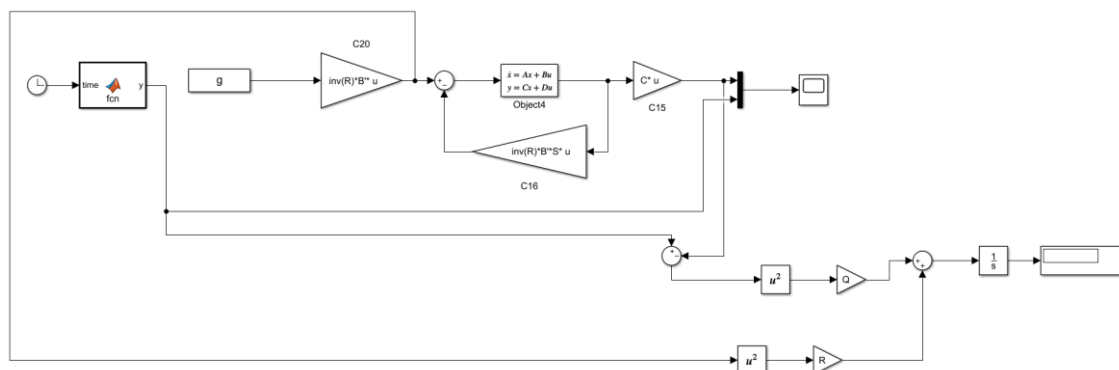


Рисунок 3.2 – Базова модель слідкуючої системи у пакеті MATLAB/Simulink

Використовуючи теорію про слідкуючі системи, описану у п. 2.3, та вирішуючи відповідні рівняння Рікатті та знаходячи увесь вектор $g(t)$, можна приступати до збору якісних характеристик слідкуючої системи на базі аперіодичної ланки.

Проведемо моделювання для бажаного виходу $z(t) = \sin(t)$.

Припустимо, що рівняння Рікатті розв'язано та отримано увесь вектор $g(t)$, тоді, нехай відповідні матриці Q та r , критерію оптимальності дорівнюють:

$$Q = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } r = 5.$$

Фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: достатня точність у слідкуванні за бажаним виходом більш важлива, ніж оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.3.

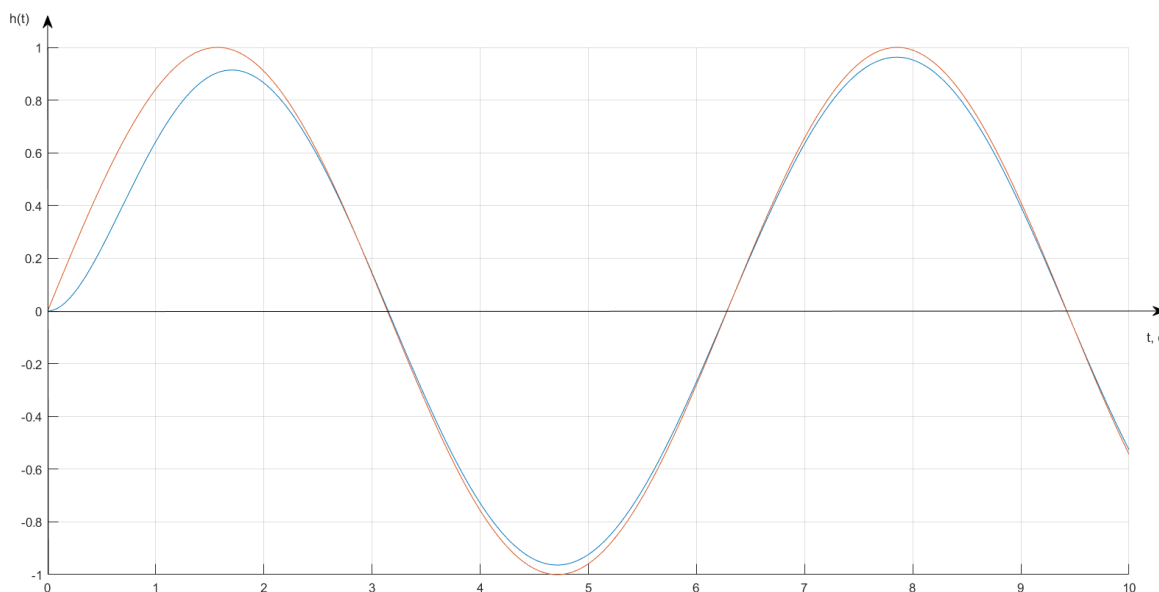


Рисунок 3.3 – Результат моделювання слідкуючої системи, у випадку коли точність слідкування вища за оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.3, слідкуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 238.6.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

Отже, фізичний зміст критерію у такому випадку можна описати наступним чином: достатня точність у слідкуванні за бажаним виходом так само важлива, як і оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.4.

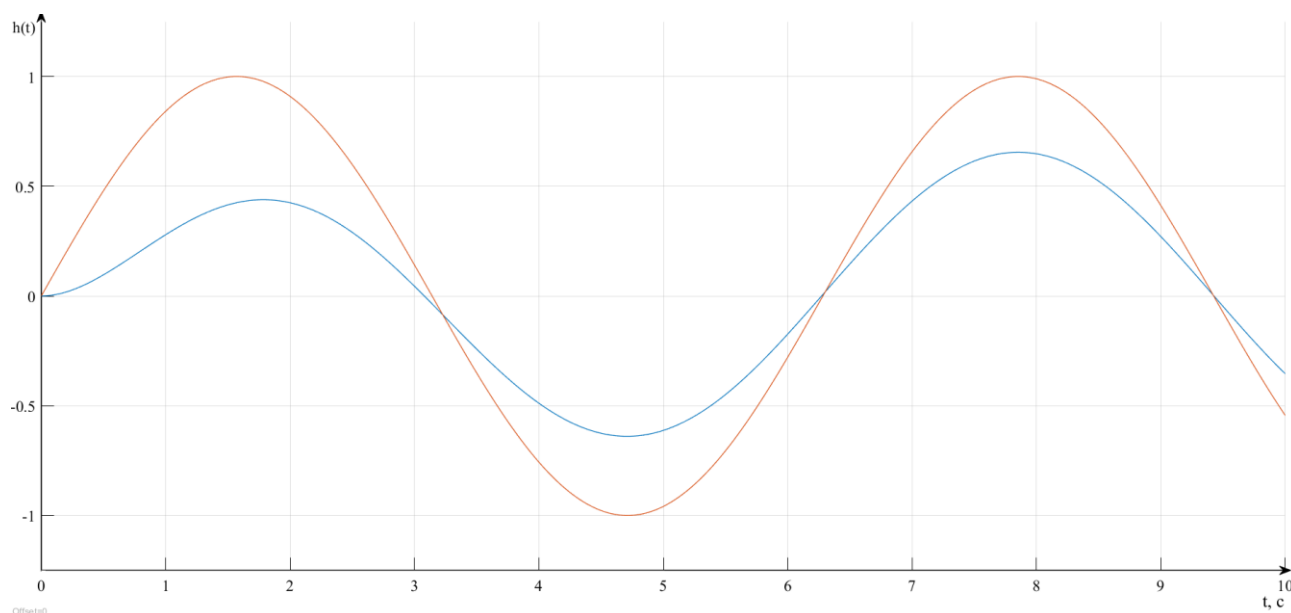


Рисунок 3.4 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли точність сліdkування так само важлива, як і оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.4, сліdkуюча система достатньо точно справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на такому рівні, котрий дозволяв «штраф» на енергію.

Критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 194.8.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

За таких умов фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: оптимальне використання енергії більш важливе ніж точність у сліdkуванні за бажаною величиною виходу.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.5.

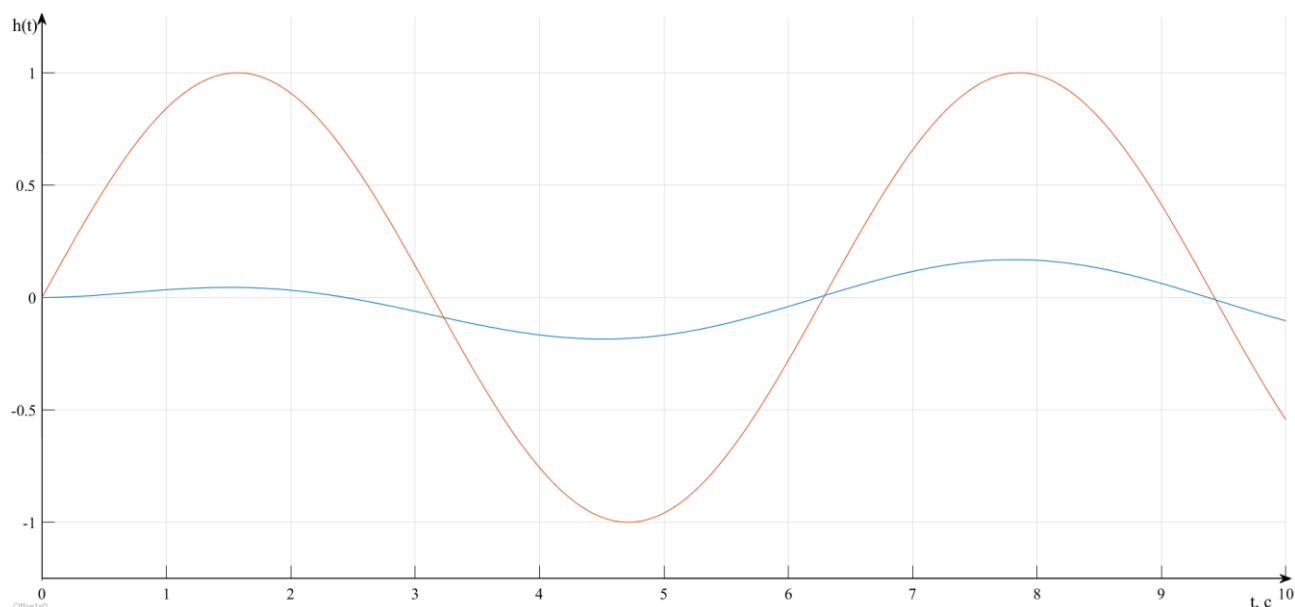


Рисунок 3.5 – Результат моделювання слідкуючої системи, у випадку коли оптимальне використання енергії більш важливе аніж точність у слідкуванні

Як видно із рисунку 3.5 результат легко було передбачити. Вихідне значення системи доволі віддалено нагадує величину бажаного, однак критерій оптимальності у даному випадку склав:

$$J = 21.25.$$

Далі, для спрощення викладок, автор продемонструє результати двох інших експериментів, для відповідних функцій бажаного виходу, при наступних значеннях відповідних матриць \mathbf{Q} та \mathbf{r} критерію оптимальності:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 5.$$

Результати усіх експериментів на базі аперіодичної ланки будуть зведені у результуючу таблицю для подальших висновків.

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = 2t,$$

наведено на рисунку 3.6.

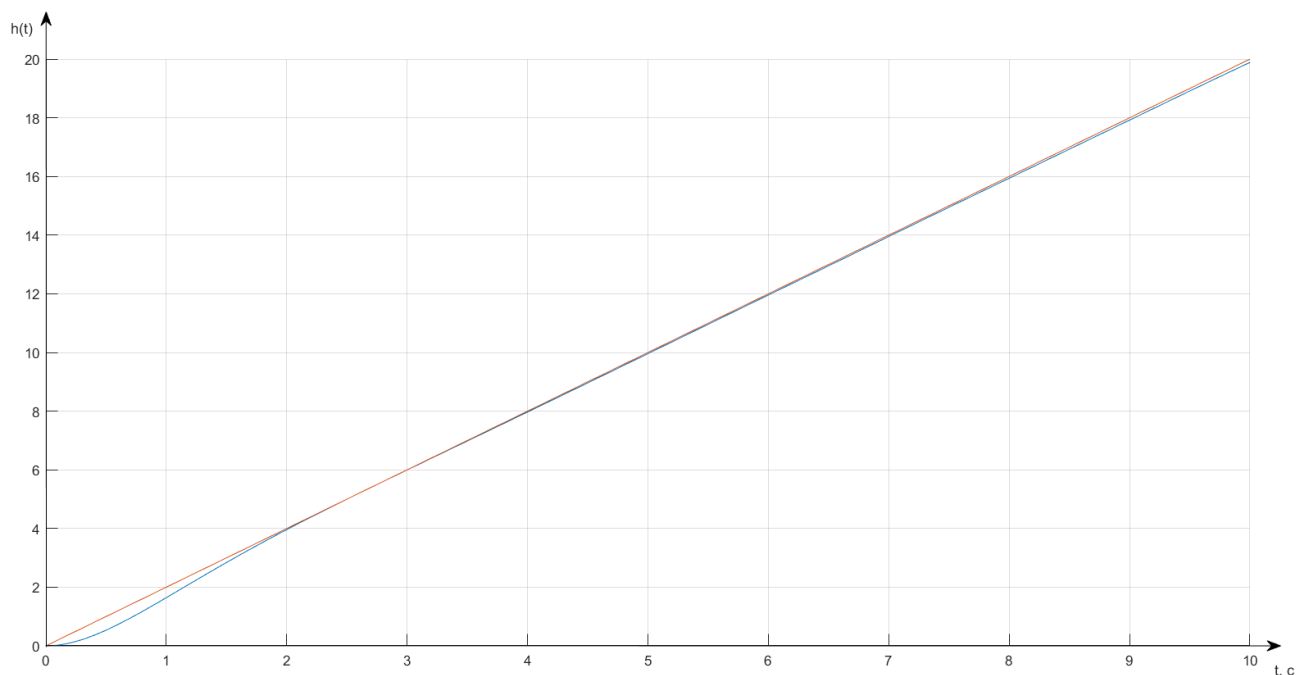


Рисунок 3.6 – Результат моделювання слідкуючої системи із лінійним бажаним виходом

Як видно із рисунку 3.6, слідкуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 80767.63.$$

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = \begin{cases} 4t, & 0 \leq t < 5, \\ 20, & 5 < t \leq 10, \\ 2t, & t > 10. \end{cases}$$

наведено на рисунку 3.7.

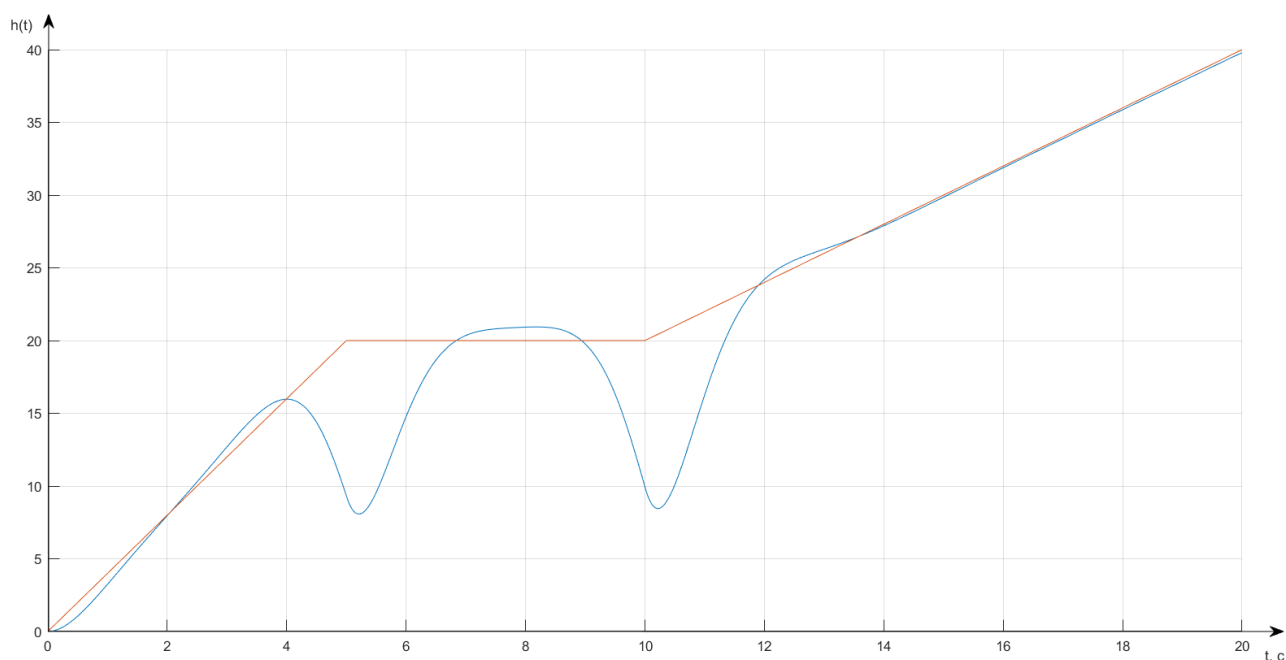


Рисунок 3.7 – Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом складеної функції

Як видно із рисунку 3.7, слідкуюча на більшості проміжку часу справлялася із задачею, за виключенням миттєвих переходів між складовими бажаної функції. Слідкуюча система будується на базі функції-вектору $g(t)$, котрій знаходиться із відповідного диференційного рівняння

$$\dot{g}(t) = -[A(t) - B(t)R^{-1}(t)B^T(t)K(t)]^T g(t) + C(t)Q(t)z(t),$$

з граничною умовою

$$g(T) = C^T(T)Fz(T).$$

Із чого робимо висновок, що у кінцевий момент часу, слідкуюча система прямує до нуля, через те, що відповідна матриця F критерію оптимальності не задана, або також рівня нулю. Ярким прикладом цього є «завали» перехідного процесу на рисунку 3.7 вихідної величини.

Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 632851.38.$$

Отже, результати після проведення усіх експериментів зведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати проведення моделювання слідкуючої системи на базі аперіодичної ланки другого порядку

Параметр Бажана функція виходу	Матриця Q	Матриця r	Час моделювання, с	Значення J
	50	5	10	238.6
	50	50	10	194.8
	5	50	10	21.25
	50	5	10	80767.63
	50	50	10	78441.02
	5	50	10	6340.5
	50	5	20	632851.38
	50	50	20	638831.43
	5	50	20	56353.9

Отже, результати експериментів показали, що підбір матриць **Q** та **r** критерію оптимальності дає змогу варіювати між вихідними результатами досліджуваного об'єкту керування, від більш точних, за повторенням бажаної величини, із нехтуванням витратами енергії, до строгої економії енергетичних запасів зі зменшенням точності у слідування за заданою величиною.

3.2 Моделювання сліdkуючої системи для консервативної ланки

Нехай об'єкт задано наступною передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{5}{4s^2 + 1}.$$

Як і раніше, потрібно дізнатися якісні характеристики досліджуваної системи. Для цього доцільно проаналізувати часові характеристики, зокрема – перехідний процес реакції на одиничний стрибок.

На рисунку 3.8 показано графік перехідного процесу консервативної ланки.

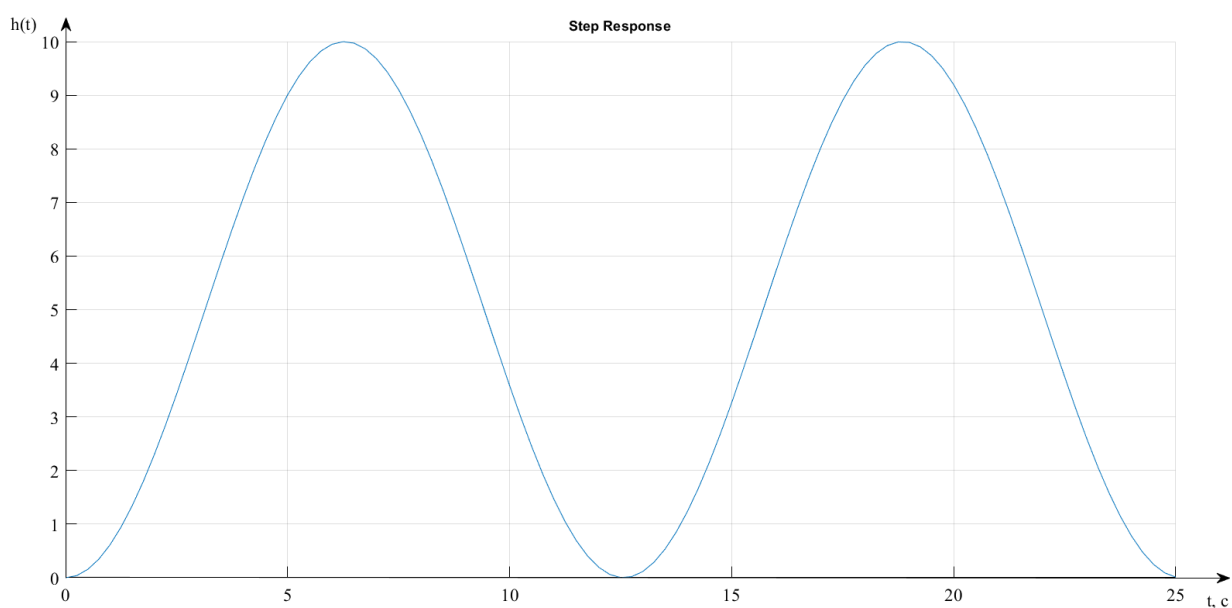


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика консервативної ланки

Легко помітити, що обрана консервативна ланка є нестійкою, адже не встановлюється у кінцеве значення за певний проміжок часу.

Тепер, перетворимо систему із передавальної функції у відповідну модель у просторі станів за допомогою командного рядку MATLAB.

Отримуємо наступний вигляд системи у моделі у просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -0.5x_2 + 2u, \\ \dot{x}_2(t) = 0.5x_1, \\ y(t) = 1.25x_2. \end{cases}$$

та, відповідно, матриці **A**, **B**, **C**, **D**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1.25],$$

$$\mathbf{D} = 0.$$

Тепер, коли усі дані про об'єкт зібрані, можна приступати до моделювання сліdkуючої системи для консервативної ланки, як об'єкту керування.

На рисунку 3.9 показано базову модель для моделювання сліdkуючої системи.

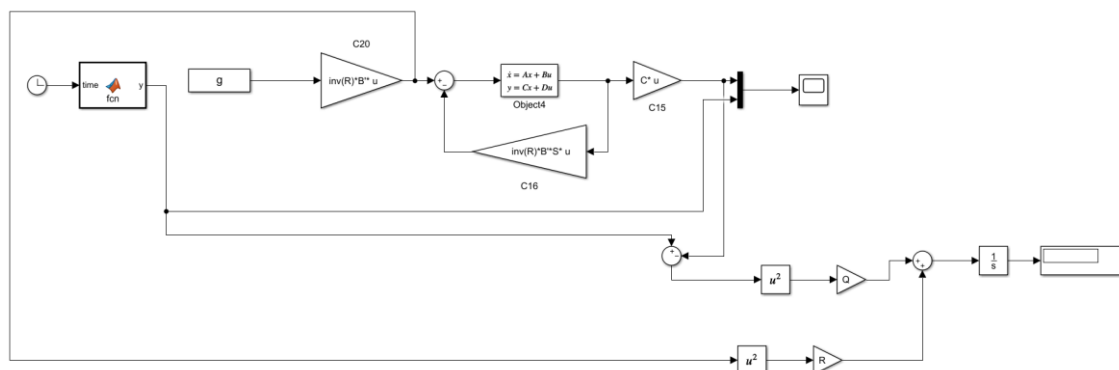


Рисунок 3.9 – Базова модель слідкуючої системи у MATLAB/Simulink

Використовуючи теорію про слідкуючі системи, описану у п. 2.3, та вирішуючи відповідні рівняння Рікатті та знаходячи увесь вектор $g(t)$, можна приступати до збору якісних характеристик слідкуючої системи на базі консервативної ланки.

Проведемо моделювання для бажаного виходу $z(t) = \sin(t)$.

Припустимо, що рівняння Рікатті розв'язано та отримано увесь вектор $g(t)$, тоді, нехай відповідні матриці Q та r , критерію оптимальності дорівнюють:

$$Q = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } r = 5.$$

тоді, фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: достатня точність у слідкуванні за бажаним виходом більш важлива, ніж оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.10.

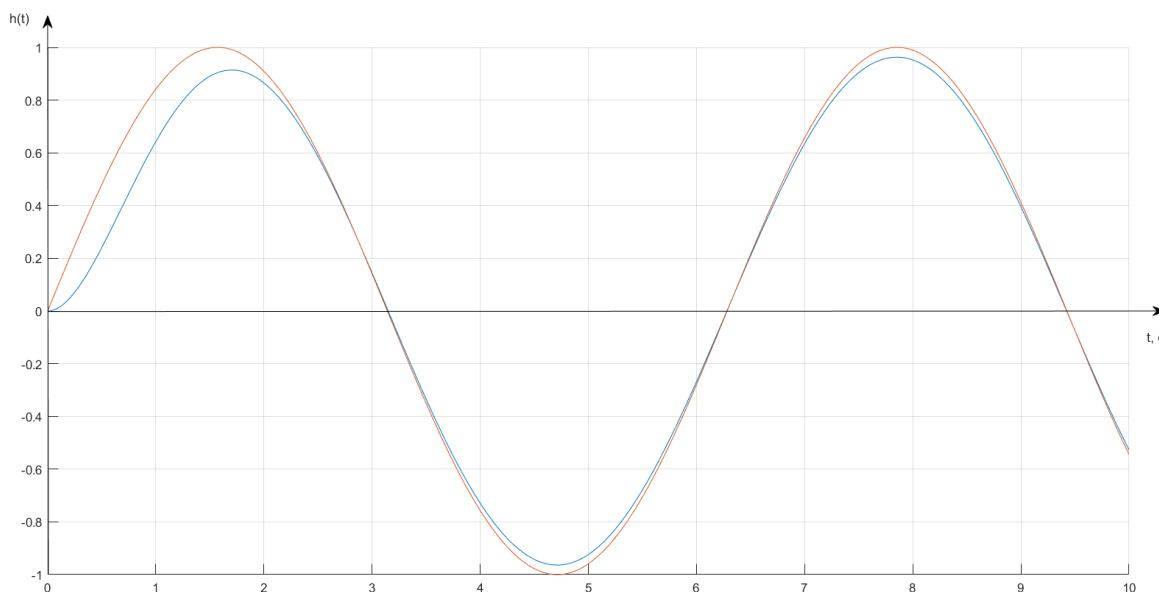


Рисунок 3.10 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли точність сліdkування вища за оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.10, сліdkуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 241.9.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

Отже, фізичний зміст критерію у такому випадку можна описати наступним чином: достатня точність у сліdkуванні за бажаним виходом так само важлива, як і оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.11.

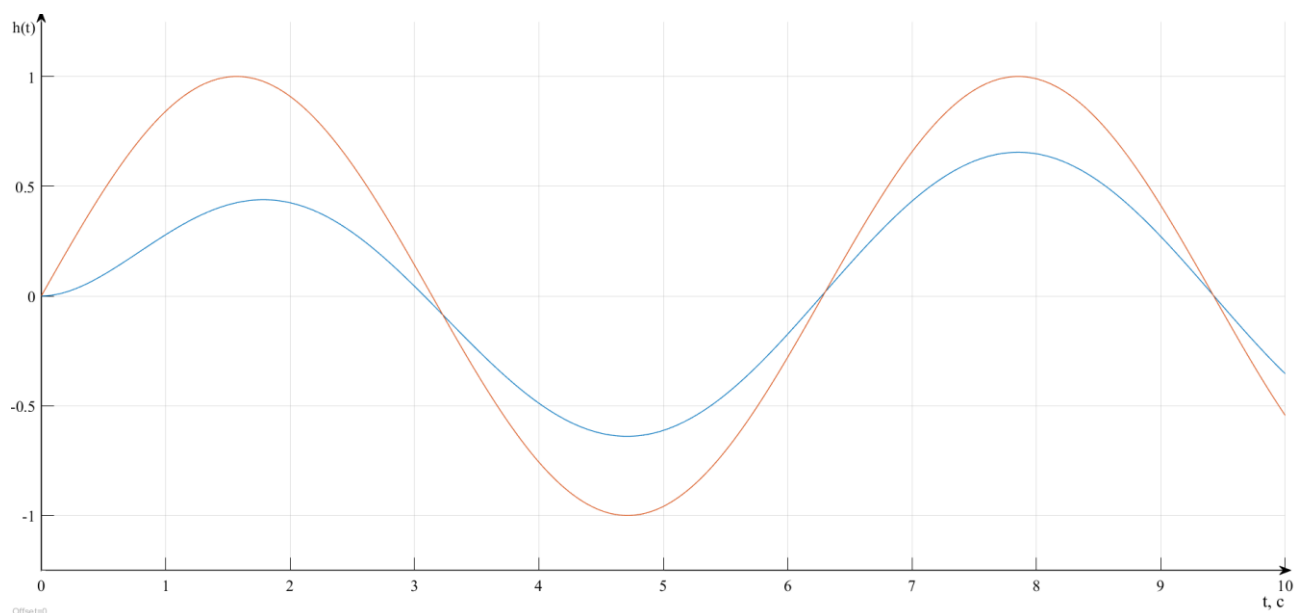


Рисунок 3.11 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли точність сліdkування так само важлива, як і оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.11, сліdkуюча система достатньо точно справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на такому рівні, котрий дозволяв «штраф» на енергію.

Критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 199.7.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

За таких умов фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: оптимальне використання енергії більш важливе ніж точність у сліdkуванні за бажаною величиною виходу.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.12.

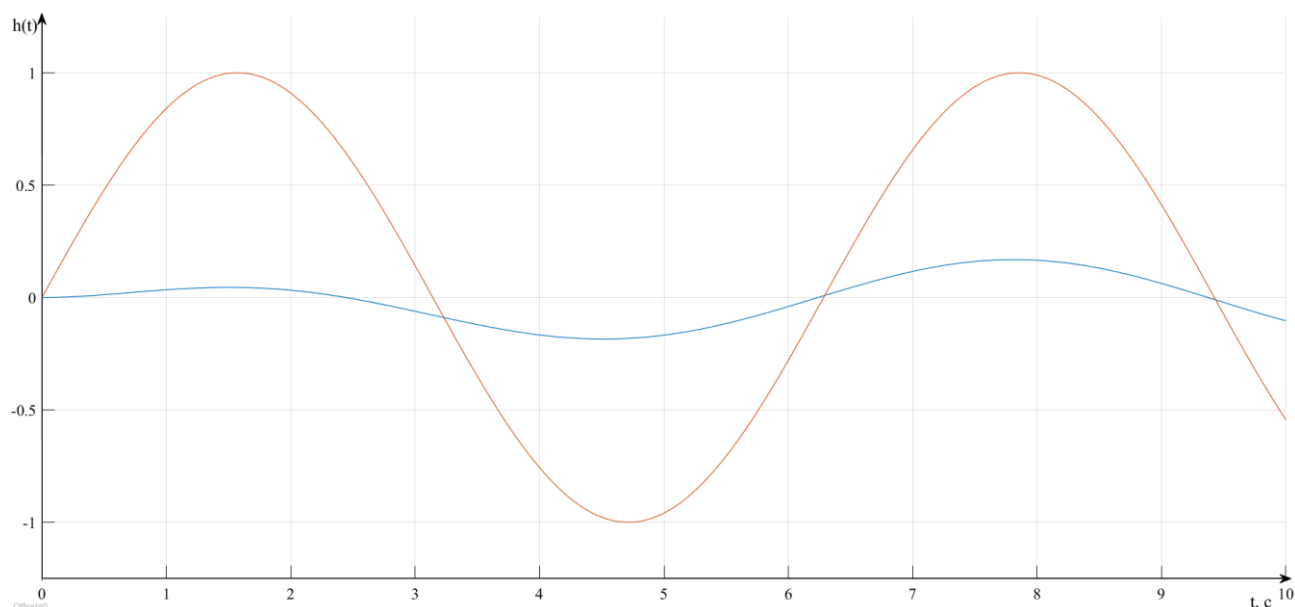


Рисунок 3.12 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли оптимальне використання енергії більш важливе аніж точність у сліdkуванні

Як видно із рисунку 3.12 результат легко було передбачити. Вихідне значення системи доволі віддалено нагадує величину бажаного, однак критерій оптимальності у даному випадку склав:

$$J = 20.82.$$

Як і раніше, для спрощення викладок, автор продемонструє результати двох інших експериментів, для відповідних функцій бажаного виходу, при наступних значеннях відповідних матриць \mathbf{Q} та \mathbf{r} критерію оптимальності:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 5.$$

Результати усіх експериментів на базі консервативної ланки будуть зведені у результуючу таблицю для подальших висновків.

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = 2t ,$$

наведено на рисунку 3.13.

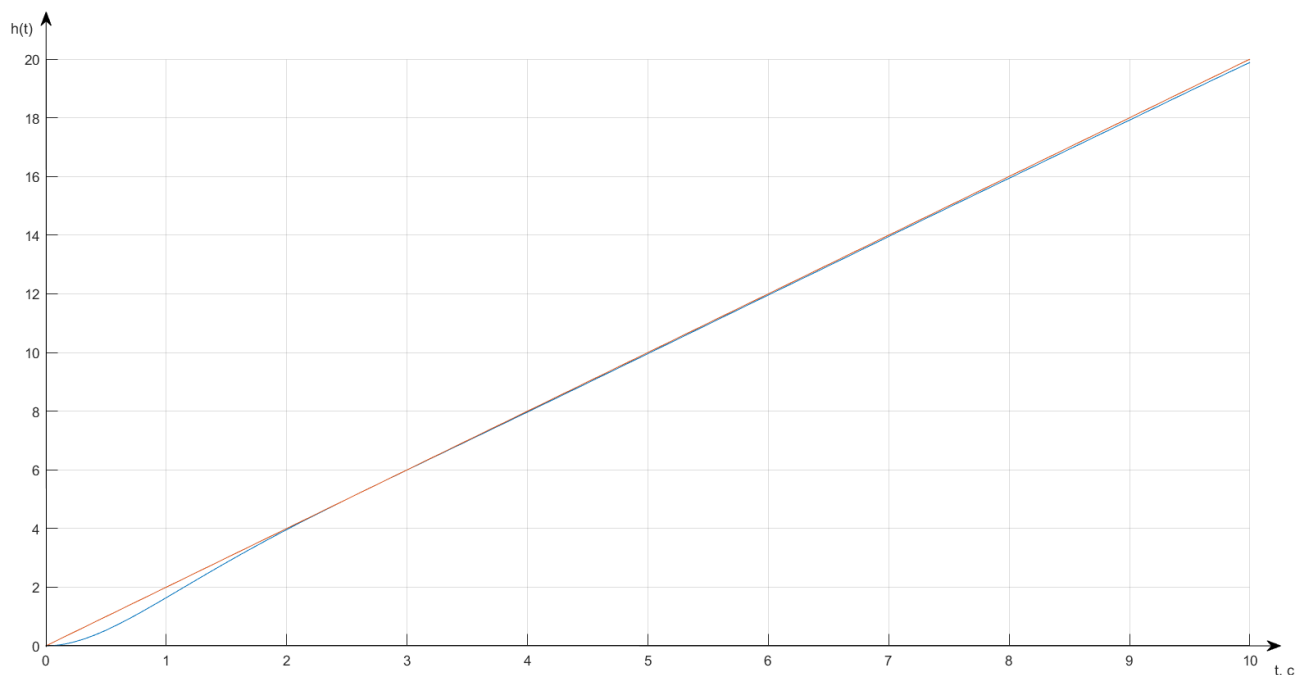


Рисунок 3.13 – Результат моделювання слідкуючої системи із лінійним бажаним виходом

Як видно із рисунку 3.13, слідкуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 80929.74 .$$

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = \begin{cases} 4t, & 0 \leq t < 5, \\ 20, & 5 < t \leq 10, \\ 2t, & t > 10. \end{cases}$$

наведено на рисунку 3.14.

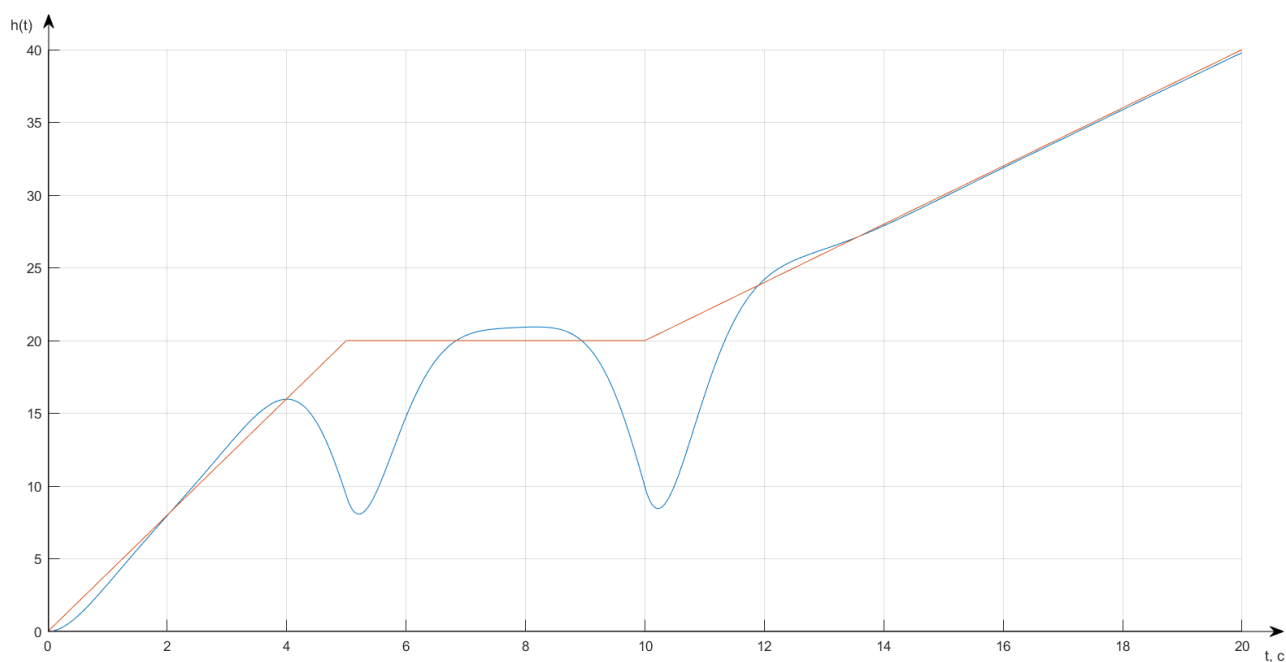


Рисунок 3.14 – Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом складеної функції

Як було описано раніше, «завали» вихідної величини слідкуючої системи є наслідком її математичних особливостей.

Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 632358.28.$$

Отже, результати після проведення усіх експериментів зведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати проведення моделювання слідкуючої системи на базі консервативної ланки другого порядку

Параметр Бажана функція виходу	Матриця Q	Матриця r	Час моделювання, с	Значення J
	50	5	10	241.9
	50	50	10	199.7
	5	50	10	20.82
	50	5	10	80929.74
	50	50	10	79603.51
	5	50	10	6741.56
	50	5	20	632358.28
	50	50	20	639155.55
	5	50	20	59937.9

Отже, результати експериментів так само показали, що підбір матриць Q та r критерію оптимальності дає змогу варіювати між вихідними результатами досліджуваного об'єкту керування, від більш точних, за повторенням бажаної величини, із нехтуванням витратами енергії, до строгої економії енергетичних запасів зі зменшенням точності у слідкуванні за заданою величиною.

3.3 Моделювання слідкуючої системи на базі коливальної ланки

Нехай об'єкт задано наступною передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{5}{4s^2 + 0.4s + 1}.$$

Визначимо якісні характеристики досліджуваної системи. Для цього доцільно проаналізувати часові характеристики, зокрема – перехідний процес реакції на одиничний стрибок.

На рисунку 3.15 показано графік перехідного процесу коливальної ланки.

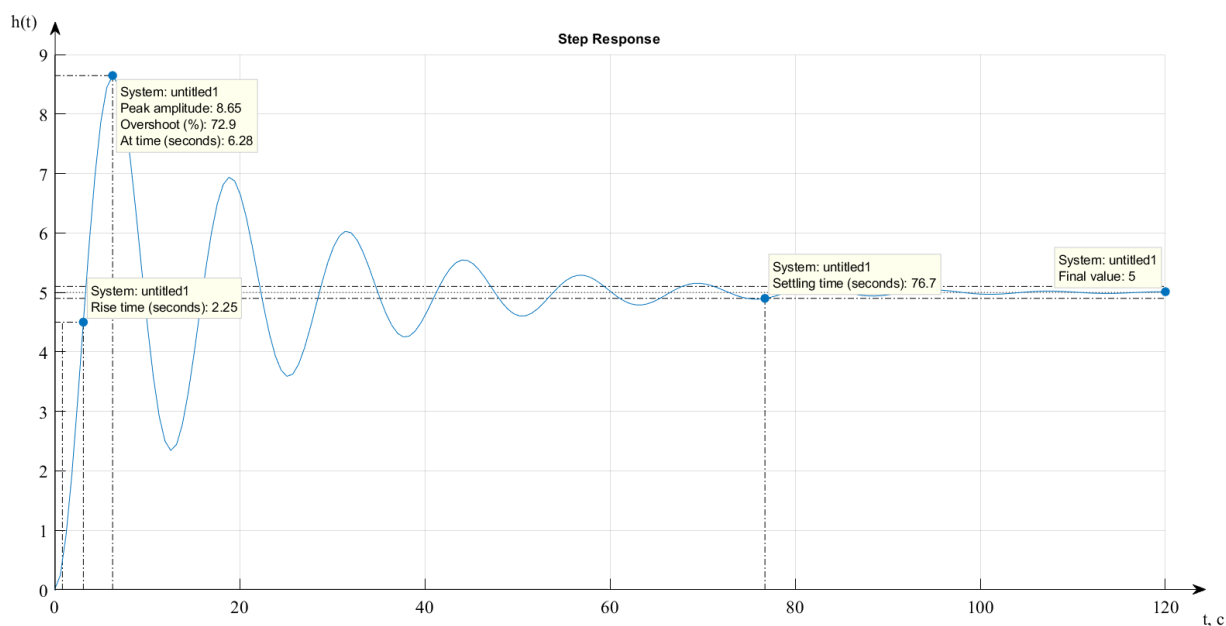


Рисунок 3.15 – Перехідна характеристика коливальної ланки

Як видно із рисунку 3.15 обрана система має наступні характеристики:

- 1) усталений час – 2.25 с;
- 2) перерегулювання – 72.9 %;
- 3) час перехідного процесу – 76.7 с;
- 4) усталене значення – 5.

Легко помітити, що обрана коливальна ланка є стійкою, адже встановлюється у кінцеве значення за певний проміжок часу. Також система є доволі нестійкою адже перерегулювання виходить за звичні рамки 10...25%. Система має доволі малу швидкодію.

Тепер, перетворимо систему із форми передавальної функції у відповідну модель у просторі станів із допомогою командного рядку MATLAB.

Отримуємо наступний вигляд системи у моделі у просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -0.1x_1 - 0.5x_2 + 2u, \\ \dot{x}_2(t) = 0.5x_1, \\ y(t) = 1.25x_2. \end{cases}$$

та, відповідно, матриці **A**, **B**, **C**, **D**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.1 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1.25],$$

$$\mathbf{D} = 0.$$

Тепер, коли усі дані про об'єкт зібрані, можна приступати до моделювання сліdkуючої системи для коливальної ланки, як об'єкту керування.

На рисунку 3.16 показано базову модель для моделювання сліdkуючої системи.

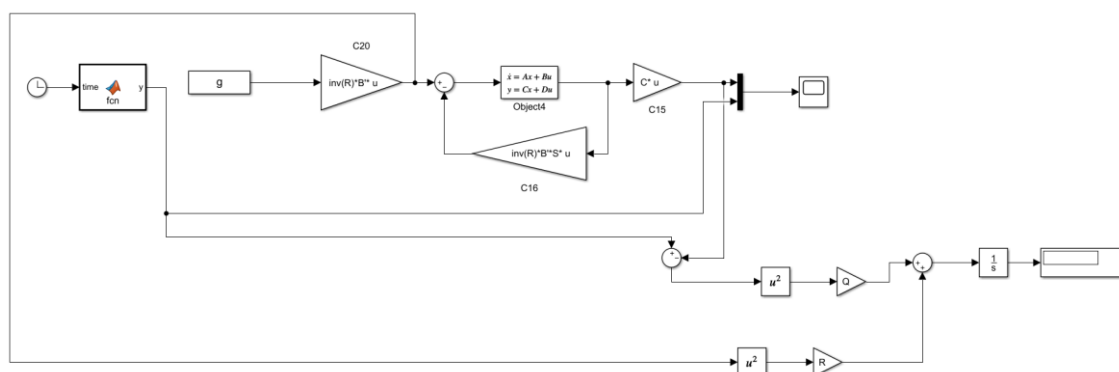


Рисунок 3.16 – Базова модель слідкуючої системи

Використовуючи теорію про слідкуючі системи, описану у п. 2.3, та вирішуючи відповідні рівняння Рікатті та знаходячи увесь вектор $g(t)$, можна приступати до збору якісних характеристик слідкуючої системи на базі консервативної ланки.

Проведемо моделювання для бажаного виходу $z(t) = \sin(t)$.

Припустимо, що рівняння Рікатті розв'язано та отримано увесь вектор $g(t)$, тоді, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 5.$$

тоді, фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: достатня точність у слідкуванні за бажаним виходом більш важлива, аніж оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.17.

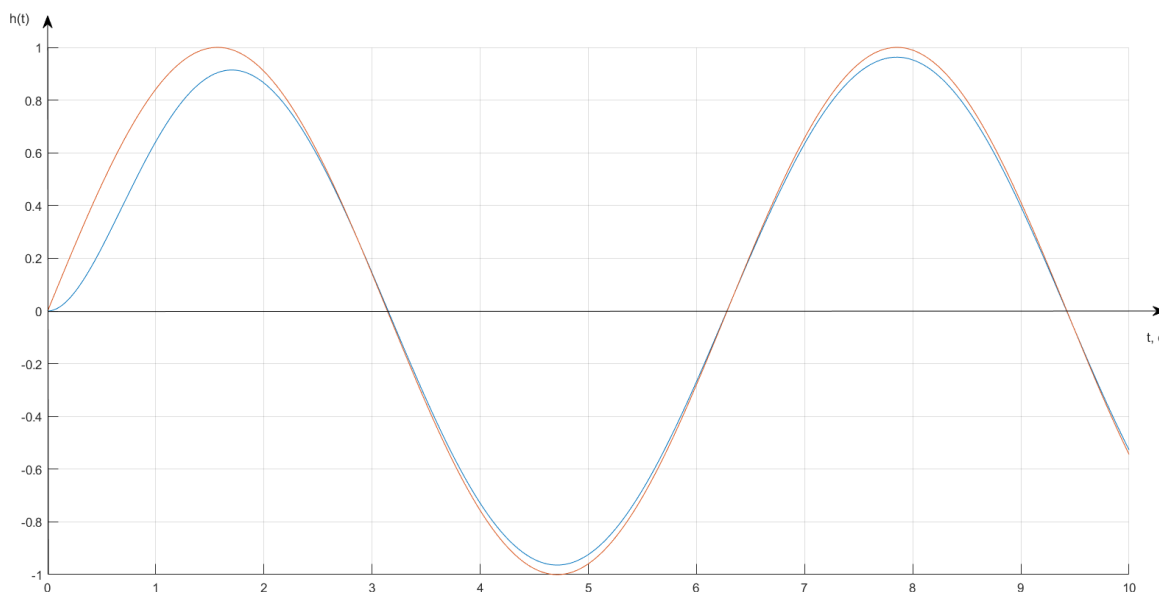


Рисунок 3.17 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли точність сліdkування вища за оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.17, сліdkуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 241.8.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

Отже, фізичний зміст критерію у такому випадку можна описати наступним чином: достатня точність у сліdkуванні за бажаним виходом так само важлива, як і оптимальне використання енергії.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.18.

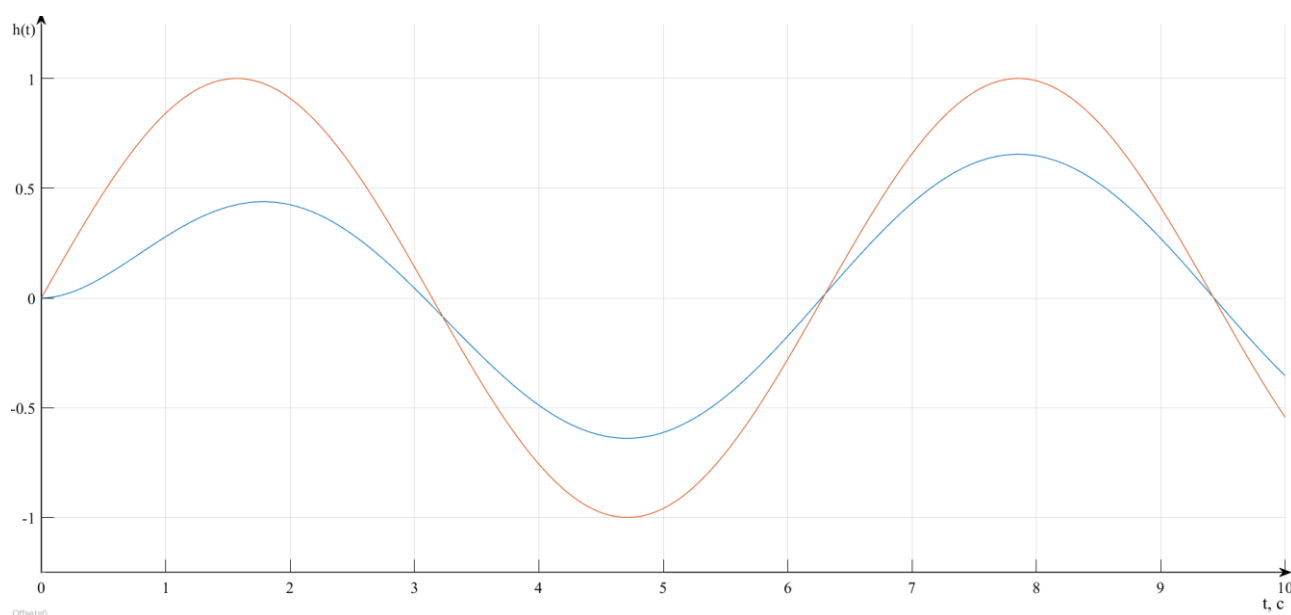


Рисунок 3.18 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли точність сліdkування так само важлива, як і оптимальне використання енергії

Як видно із рисунку 3.18, сліdkуюча система достатньо точно справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на такому рівні, котрий дозволяв «штраф» на енергію.

Критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 199.4.$$

Тепер, нехай відповідні матриці \mathbf{Q} та \mathbf{r} , критерію оптимальності дорівнюють:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 50.$$

За таких умов фізичний зміст критерію можна описати наступним чином: оптимальне використання енергії більш важливе ніж точність у сліdkуванні за бажаною величиною виходу.

Час моделювання – 10 с.

Результат моделювання наведено на рисунку 3.19.

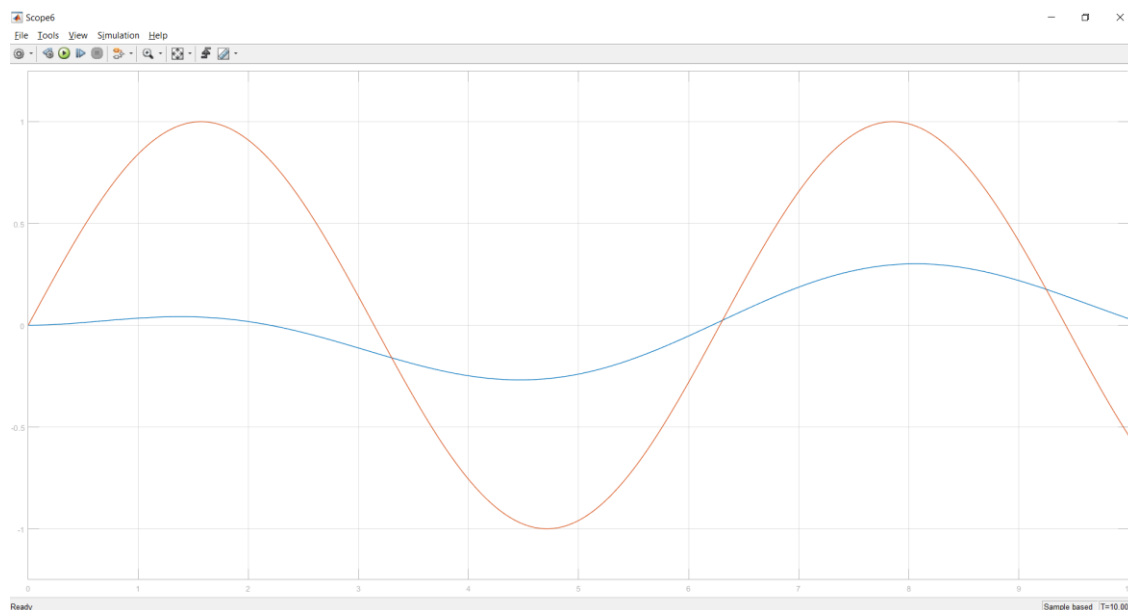


Рисунок 3.19 – Результат моделювання сліdkуючої системи, у випадку коли оптимальне використання енергії більш важливе аніж точність у сліdkуванні

Як видно із рисунку 3.19 результат, як і до цього, легко було передбачити. Вихідне значення системи доволі віддалено нагадує величину бажаного, однак критерій оптимальності у даному випадку склав:

$$J = 20.83.$$

Як і раніше, для спрощення викладок, автор продемонструє результати двох інших експериментів, для відповідних функцій бажаного виходу, при наступних значеннях відповідних матриць \mathbf{Q} та \mathbf{r} критерію оптимальності:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \text{ та } \mathbf{r} = 5.$$

Результати усіх експериментів на базі консервативної ланки будуть зведені у результуючу таблицю для подальших висновків.

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = 2t,$$

наведено на рисунку 3.20.

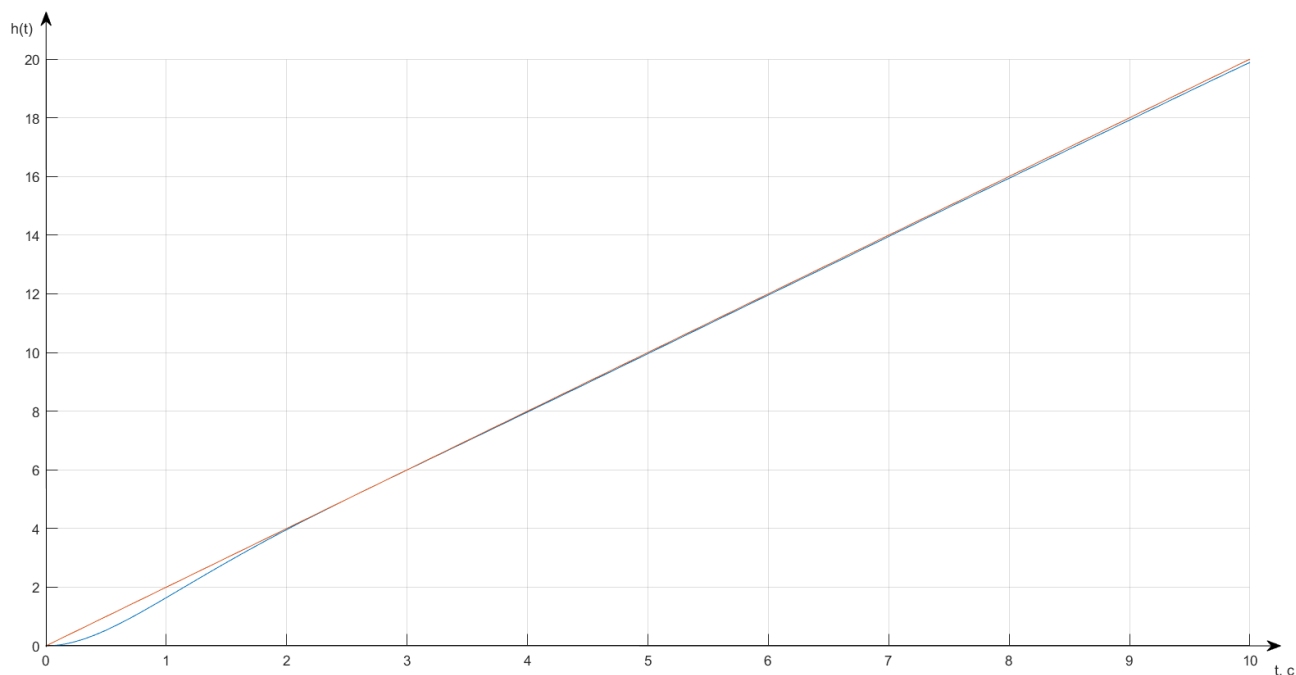


Рисунок 3.20 – Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом $z(t) = 2t$

Як видно із рисунку 3.20, слідкуюча система справилася із поставленою задачею і намагалася тримати реальний вихід біля бажаного на достатньому рівні точності. Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 80923.14.$$

Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом

$$z(t) = \begin{cases} 4t, & 0 \leq t < 5, \\ 20, & 5 < t \leq 10, \\ 2t, & t > 10. \end{cases}$$

наведено на рисунку 3.21.

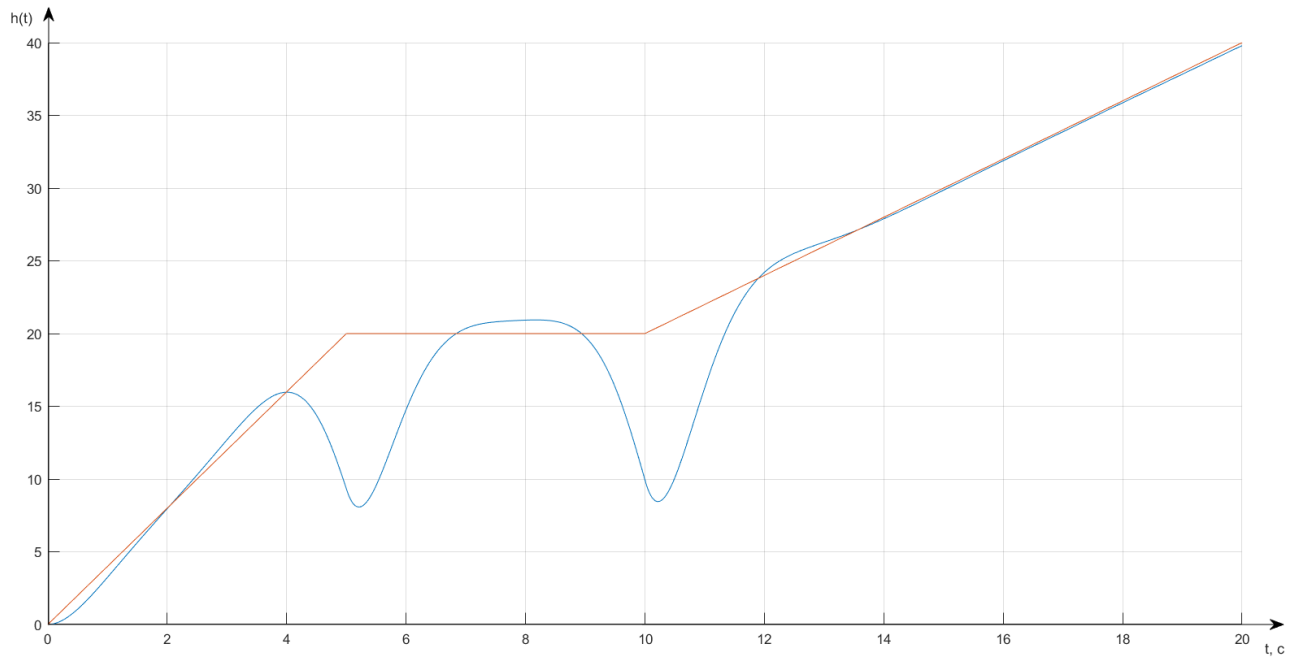


Рисунок 3.21 – Результат моделювання слідкуючої системи із бажаним виходом складеної функції

Як було описано раніше, «завали» вихідної величини слідкуючої системи є наслідком її математичних особливостей.

Враховуючи малий «штраф» на енергію, критерій оптимальності наприкінці моделювання склав:

$$J = 568418.$$

Отже, результати після проведення усіх експериментів зведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати проведення моделювання слідкуючої системи на базі консервативної ланки другого порядку

Параметр Бажана функція виходу	Матриця Q	Матриця r	Час моделювання, с	Значення J
	50	5	10	241.8
	50	50	10	199.4
	5	50	10	20.83
	50	5	10	80923.14
	50	50	10	79553.7
	5	50	10	6718.27
	50	5	20	568418
	50	50	20	539011.89
	5	50	20	47583.8

Отже, результати експериментів так само показали, що підбір матриць Q та r критерію оптимальності дає змогу варіювати між вихідними результатами досліджуваного об'єкту керування, від більш точних, за повторенням бажаної величини, із нехтуванням витратами енергії, до строгої економії енергетичних запасів зі зменшенням точності у слідкуванні за заданою величиною.

3.4 Висновки

Результати моделювання дають чітке розуміння того, що теорія про слідкуючі системи, описана у п. 2.3, підтвердилася. Дійсно, підхід, із використанням слідкуючої системи, дає змогу мінімізувати витрати енергії на виконання поставлених задач.

Також, можна відмітити факт, що слідкуюча система поводить себе цілком ідентично при різних об'єктах керування. Аперіодична, консервативна та коливальна ланки, незважаючи на свою різну будову, у складі системи керування можуть відтворювати будь-який вхідний сигнал.

Варіювання відповідних матриць-штрафів Q та r критерію оптимальності, дають широкі можливості для тонкого налаштування слідкуючої системи, на основі відповідних вимог технічного завдання.

Підтвердилось також фізичне значення енергетичного критерію оптимальності. Результати демонструють чітку закономірність того, що при збільшенні значення матриці-штрафу, на використання енергії, зменшується кінцеве значення всього критерію. І, навпаки, при перевазі матриці-штрафу на точність слідкування, над матрицею-штрафу на енергію – кінцеве значення критерію відповідно збільшується.

Отже, задача, котру автор ставив для виконання у цьому розділі, а саме перевірка теоретичних засад слідкуючих систем – цілком досягнута, а результати дають змогу з упевненістю йти далі. Наразі автор має всі підстави до реалізації слідкуючої системи на базі робота LEGO NXT, чому будуть присвячені наступні розділи магістерської дисертації.

4 ПОБУДОВА ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ МОДЕЛІ ПРОСТОРУ СТАНІВ

За основу для розроблення макету у рамках даної дисертації було обрано LEGO 9797 Mindstorms Education Base Set. Покрокові інструкції про те як побудувати базову двоколісну модель робота наведені у [3].

Модель буде побудовано на базі двох сервомоторів, власне, самого контролеру NXT та допоміжних елементів, що утворюють каркас моделі.

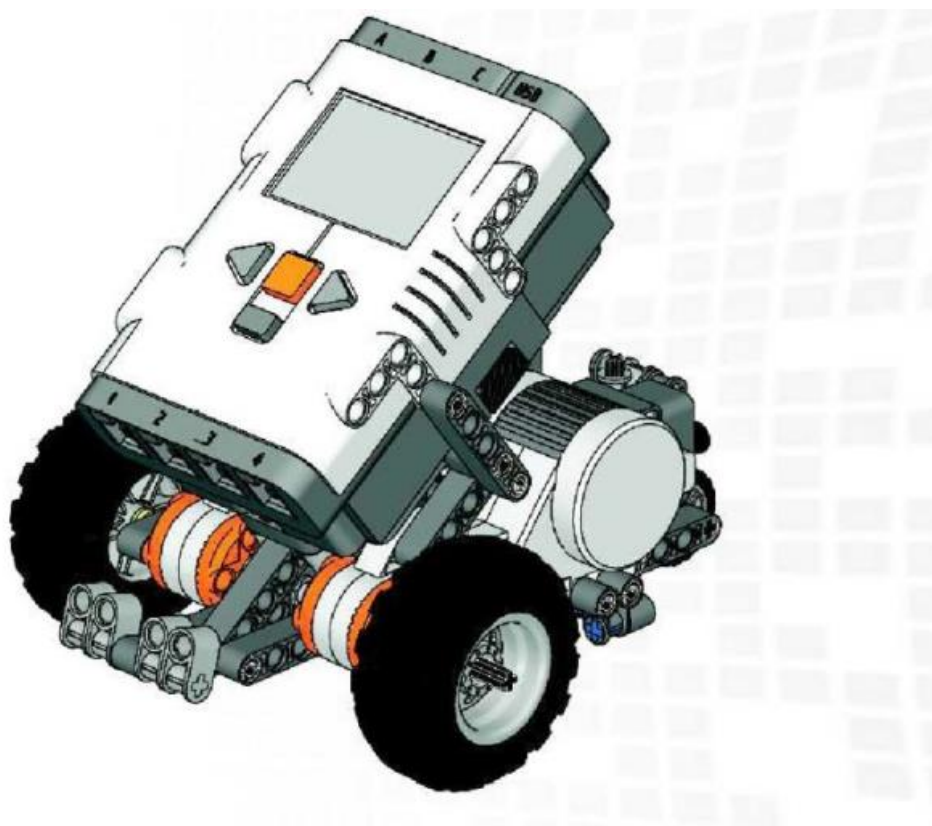


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд робота [3]

Офіційна документація LEGO надає короткий опис конструкції сервомоторів.

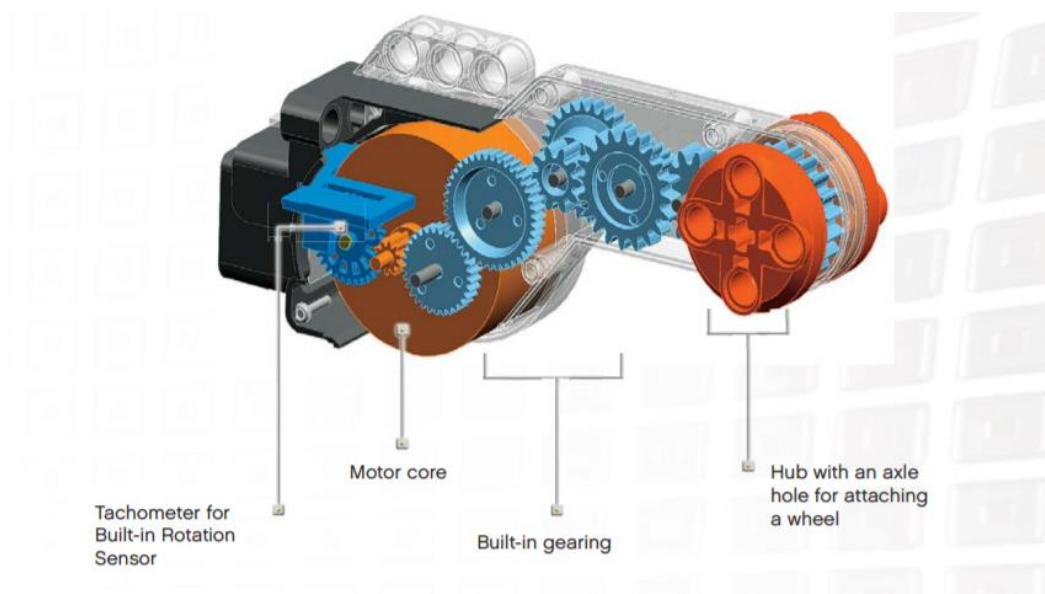


Рисунок 4.2 – Конструкція сервомотору [3]

Працюючи із сервомоторами, потрібно знати їх характеристики. Наприклад, момент обертання, струм навантаження та холостого ходу, напругу живлення і т.д.

Графік на рисунку 4.3 ілюструє залежність швидкості обертання (об. / хв.) від споживаної напруги.

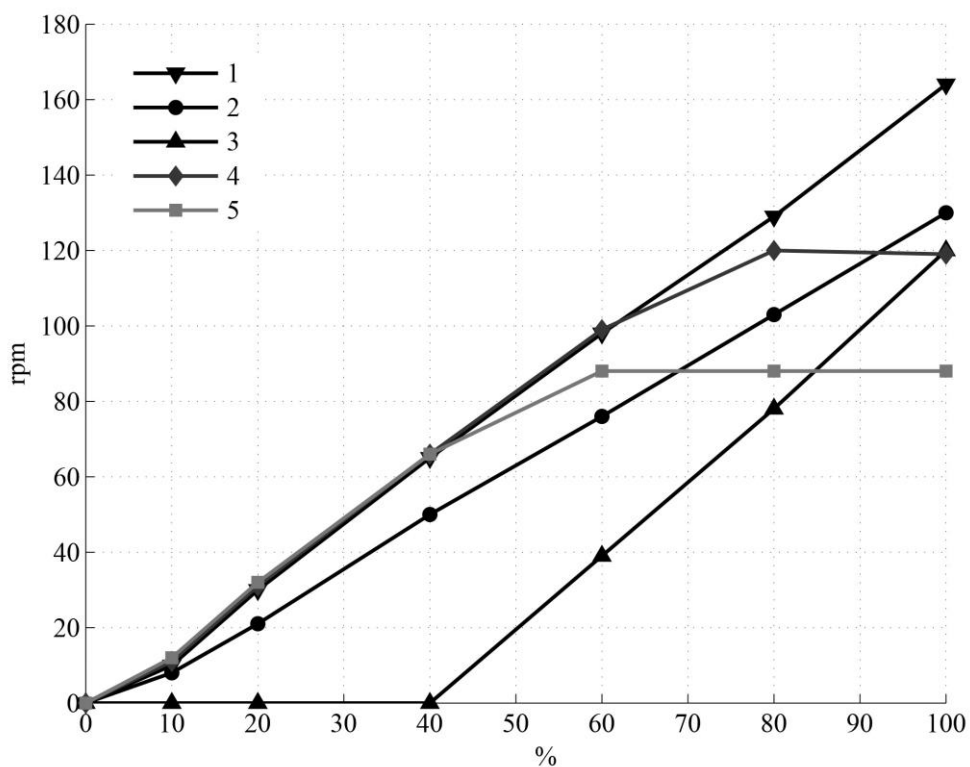


Рисунок 4.3 –Швидкість обертання в залежності від напруги

Крива «1» на графіку – напруга 9В, двигун у режимі холостого ходу. Лінійна залежність між потужністю і швидкістю двигуна є очевидною. За відсутності навантаження прикладена потужності не має сенсу.

Крива «2» – двигун у режимі холостого ходу, але цього разу NXT працює від 7,2 В (NiMH батарея). Звичайно, швидкість обертання пропорційно нижча у порівнянні із кривою «1».

Крива «3» – крутний момент двигуна 11,5 Нсм, без контролю потужності, напруга 9 В. Потужності менше 40 % ніяк не впливає на мотор (горизонтальна область кривої). Як тільки подається достатня потужність, швидкість збільшується пропорційно.

Крива «4» – крутний момент двигуна 11,5 Нсм, напруга 9 В. Лінійне збільшення обертання до 70 % потужності показує ККД двигуна. Після цього крива плоска, мотор працює на повну потужність.

Крива «5» – крутний момент 11,5 Нсм, напруга 7,2 В. Однакові характеристики, що і на кривій «1» (потужність 9 В, без навантаження), аж до 50 % потужності.

Залежність спожитого струму від моменту обертання на рисунку 4.4 є лінійною. Через обмеження потужності в драйвері і порогове значення струму відключення термістора, високе навантаження можливе на короткий час, після – вмикається захист, що знижує струм та потужність.

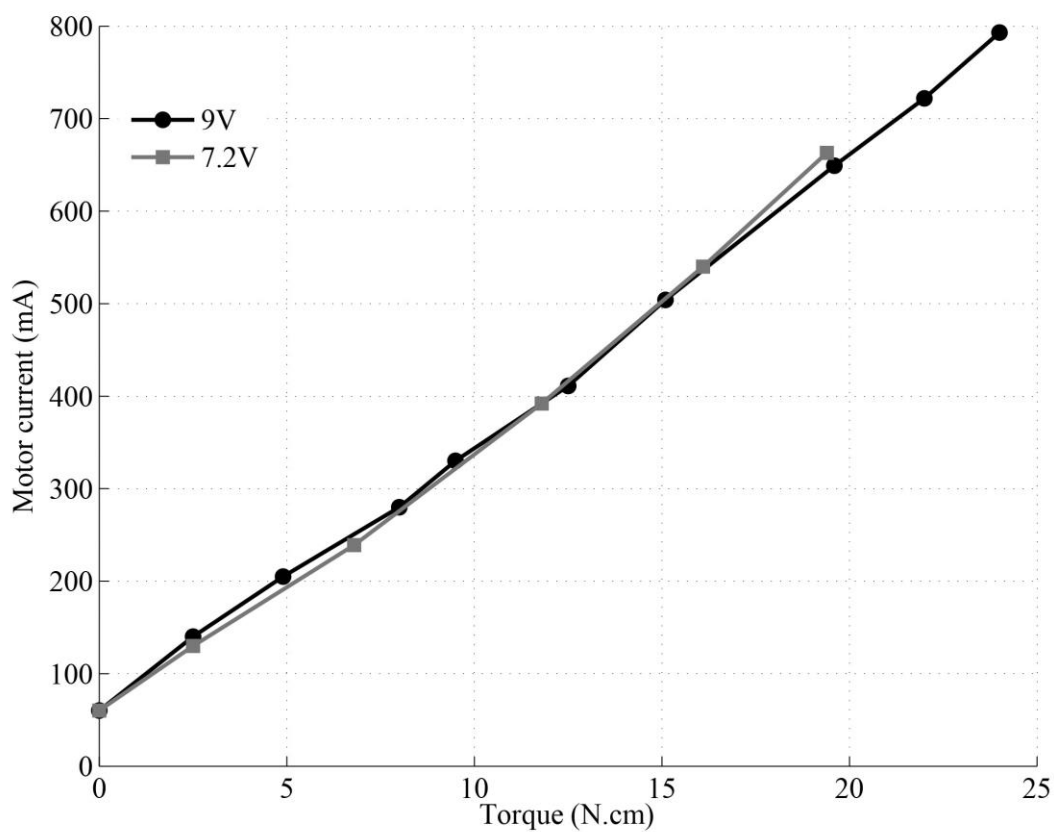


Рисунок 4.4 – Залежність моменту обертання від споживаного струму

Отже, короткий огляд дає нам зрозуміти, що сервомотори NXT показують непогані технічні параметри та мають запас для більш ефективного використання внутрішніх ресурсів.

4.1 Отримання даних для ідентифікації моделі робота

Представимо модель системи як «чорна скринька». Два входи – напруга живлення правого та лівого моторів і два виходи – зміна кута при обертанні (в градусах) відповідних моторів.

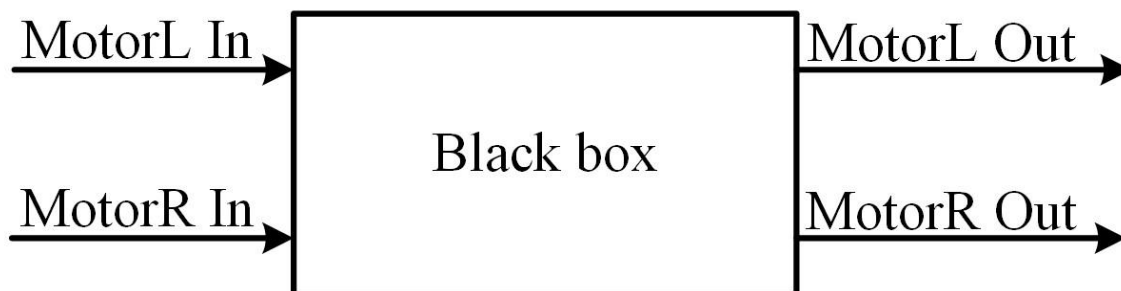


Рисунок 4.5 – Схематичне представлення моделі

Розберемо схему, представлену на рисунку 4.5. Два входи – сервомотори отримують збуджуючий вплив від контролера у діапазоні -100% ... +100% (обертання назад і вперед відповідно), котрий потім, драйвером, конвертується у -9 В ... +9 В напруги живлення обмотки. Два виходи – зміна кута обертання відповідного мотору (може бути як позитивним значенням так і негативним).

Тепер постає питання отримання відповідних даних із фізичної моделі робота, представленому на рисунку 4.2. У рамках даної дисертації було використано програмний пакет ROBOTC for LEGO Mindstorms 4.X [4].

Програмний пакет дає можливість віддаленого керування роботом за допомогою джойстика-маніпулятора Logitech F310. Віддалене керування досягається шляхом використання API методів спілкування програмного пакету ROBOTC та безпосередньо самого робота на базі LEGO NXT контролера.

Також, перевагою даного програмного пакету є те, що він дозволяє отримувати дані з давачів робота у режимі реального часу. Отримані дані можливо зберегти у форматі .csv для подальшої обробки у MATLAB та System Identification Toolbox.

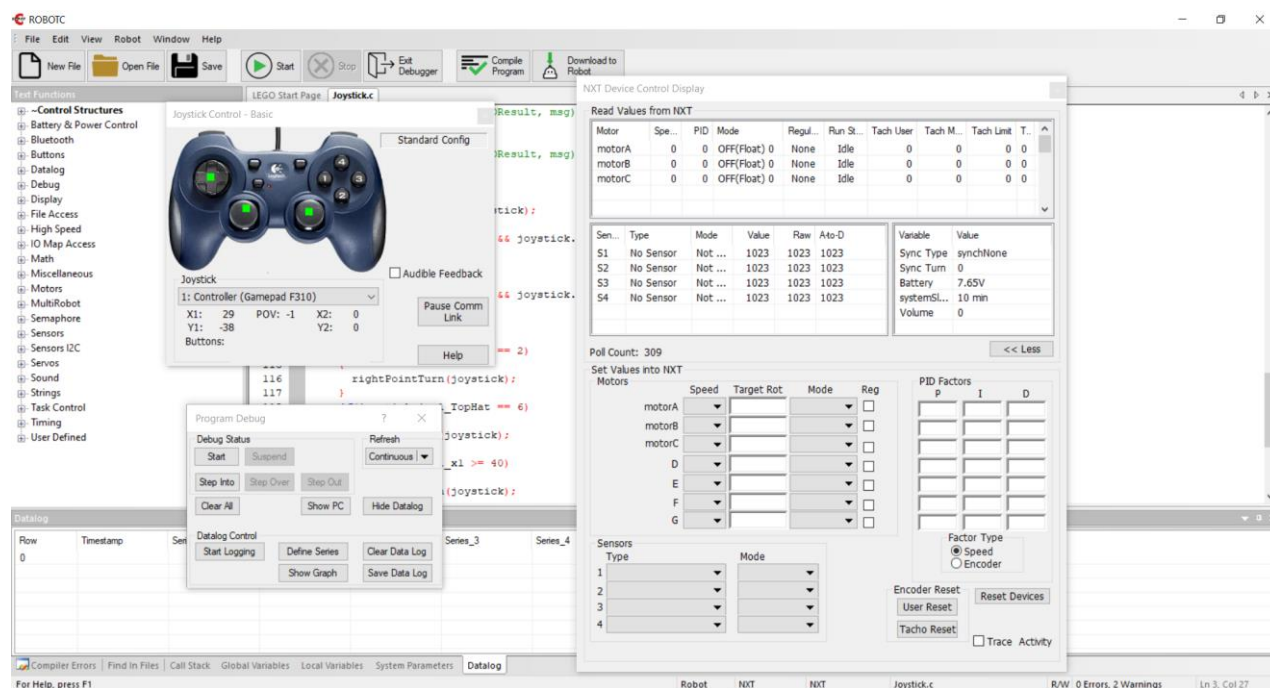


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд програмного пакету ROBOTC, запущеного у режимі віддаленого керування джойстиком-маніпулятором

У додатку Б знаходиться програмний код, задачею якого є зняття показів із джойстика-маніпулятора та переведення їх у відповідні значення для драйверів сервомоторів.

На рисунку 4.7 показано усі можливі рухи, котрих можна досягти використанням API методів програмного пакету ROBOTC. MotorC and MotorB – позначення лівого та правого моторів відповідно у нотації програмного пакету ROBOTC.

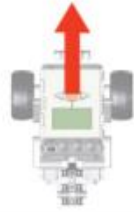

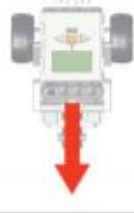



Motor commands	Resulting movement
<pre>motor[motorC]=100; motor[motorB]=100;</pre>	
<pre>motor[motorC]=50; motor[motorB]=50;</pre>	
<pre>motor[motorC]=-100; motor[motorB]=-100;</pre>	
<pre>motor[motorC]=0; motor[motorB]=0;</pre>	
<pre>motor[motorC]=100; motor[motorB]=-100;</pre>	
<pre>motor[motorC]=100; motor[motorB]=0;</pre>	

Рисунок 4.7 – Ілюстрація усіх можливих рухів двоколісного робота

Тепер, коли відомо як отримати дані від робота, можна переходити від фізичного об'єкту до моделі у просторі станів.

4.2 Побудова моделі системи у просторі станів

MATLAB System Identification Toolbox [5] надає інструменти для створення математичного представлення фізичної системи. Основна ідея – пошук математичного представлення системи у вигляді моделі у просторі станів.

Для початку, отримаємо вхідні дані із допомогою програмного пакету ROBOTC та коду, що були описані раніше.

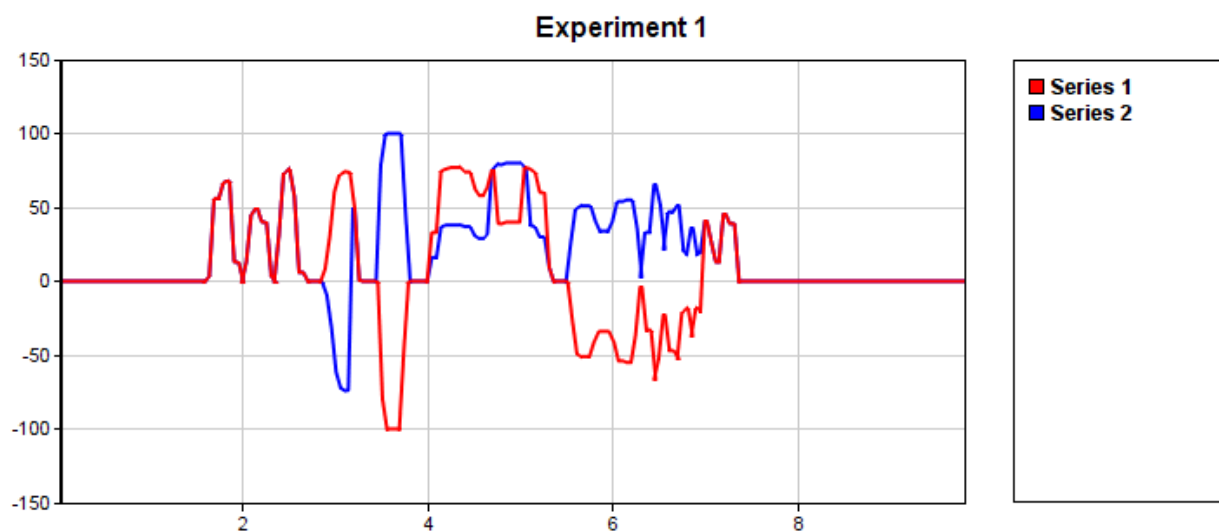


Рисунок 4.8 – Графічне представлення вхідних даних, отриманих для лівого (Series 1) та правого (Series 2) моторів

Також, для отримання моделі у просторі станів, потрібно мати відповідну реакцію фізичної системи на певний вхід.

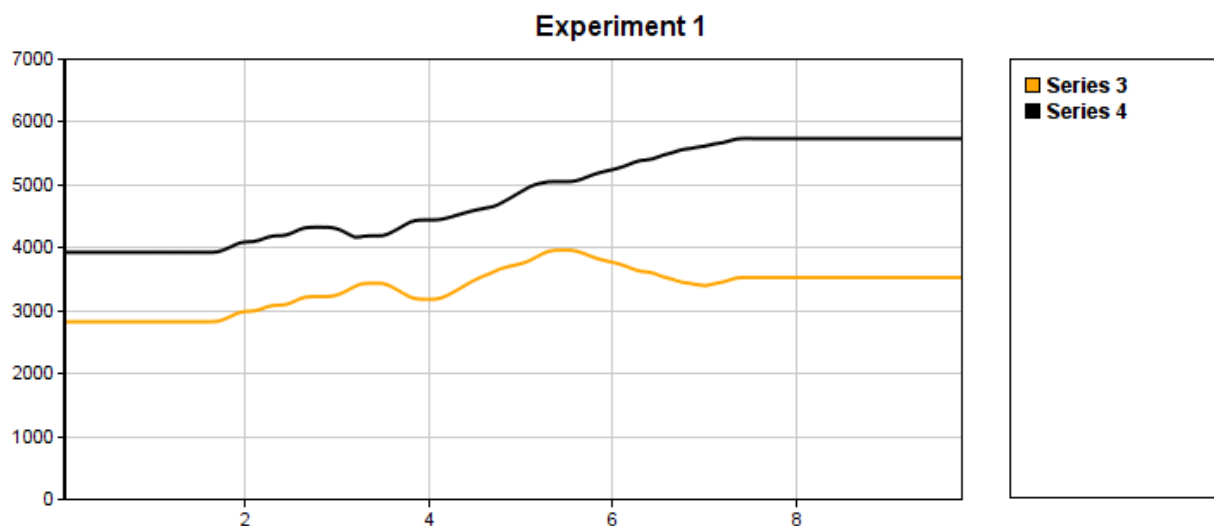
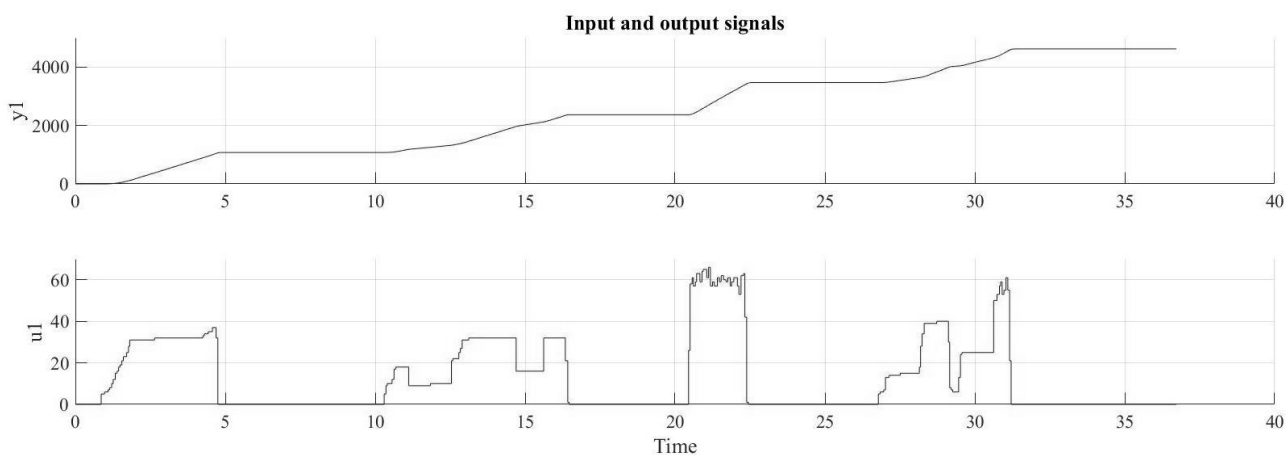
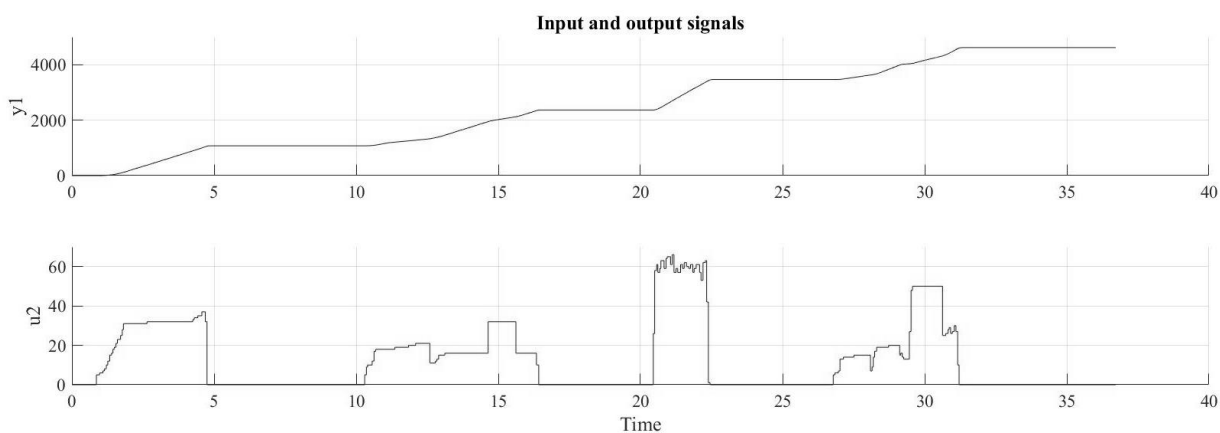


Рисунок 4.9 – Графічне представлення вихідних даних, отриманих для лівого (Series 3) та правого (Series 4) моторів

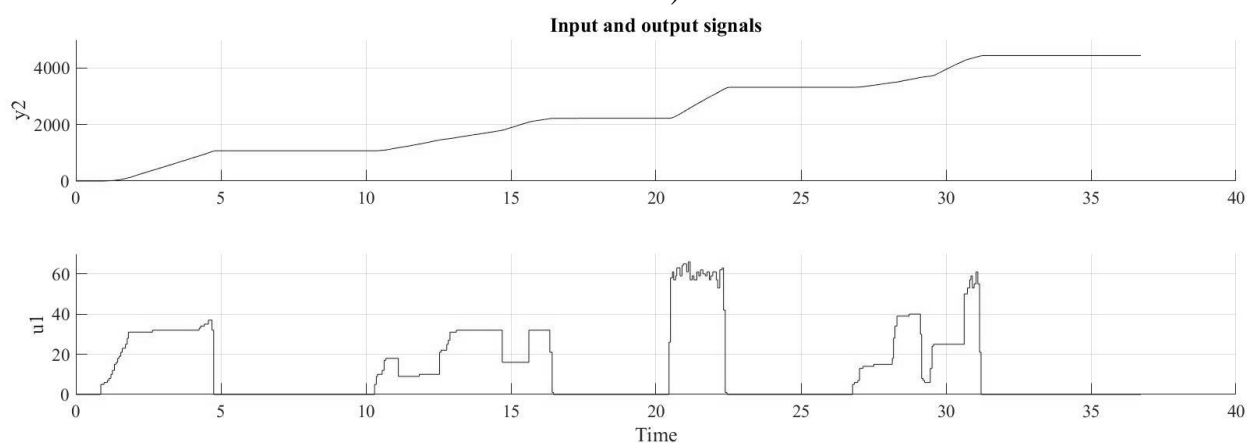
Наразі можна розпочати ідентифікацію моделі простору стану відповідно до вхідних та вихідних даних. На рисунку 4.10 відображено MIMO [6] (Multiple In Multiple Out) представлення, отриманої із допомогою MATLAB System Identification Toolbox, моделі у просторі станів.



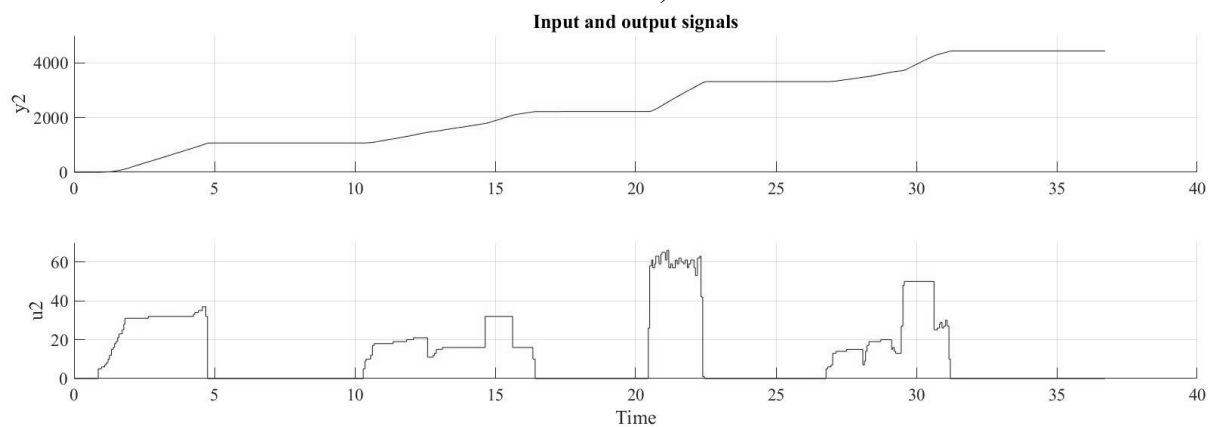
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – МІМО відображення ідентифікованої фізичної моделі: а – вплив входу «1» на вихід «1»; б – вплив входу «2» на вихід «1»; в – вплив входу «1» на вихід «2»; г – вплив входу «2» на вихід «2»

Аналізуючи рисунок 4.10 можна зазначити, що «вхід 1» не вносить достатньої частки впливу на «вихід 2», так само, як і «вхід 2» на «вихід 1», що дає змогу стверджувати про незалежність двох моторів один від одного.

На рисунках 4.11 та 4.12 наведено результат реакції ідентифікованої системи на збурюючий вплив, окремо по двом виходам.

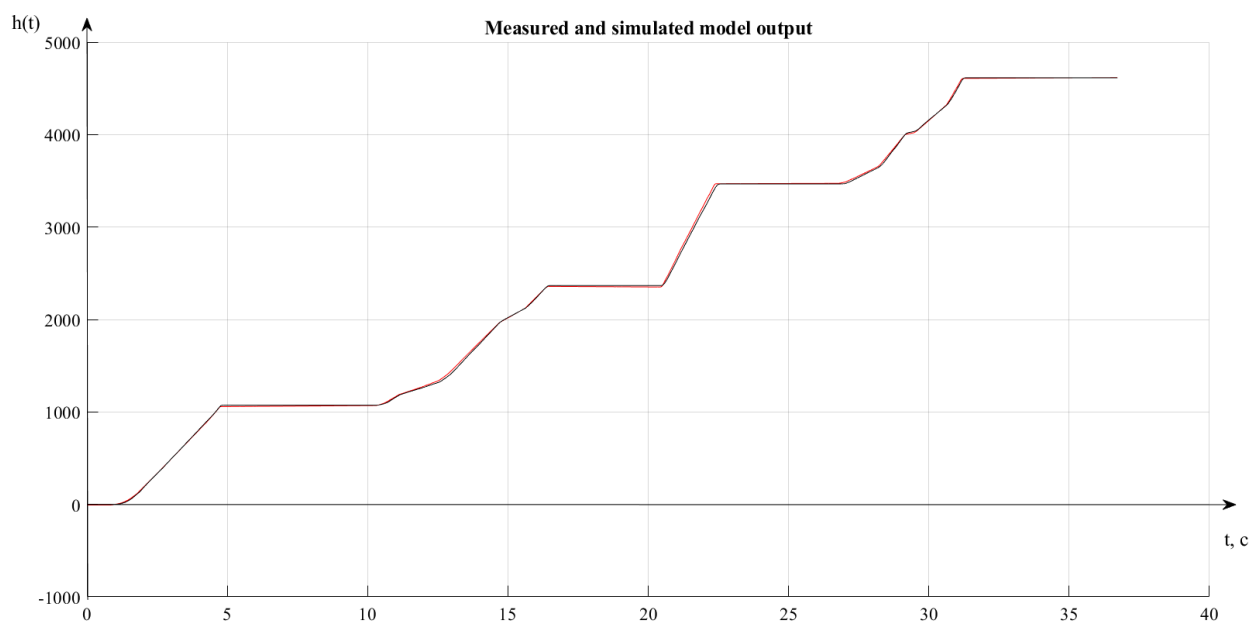


Рисунок 4.11 – Порівняння реакції еталонної та ідентифікованої систем на збурюючий вплив по «виходу 1»

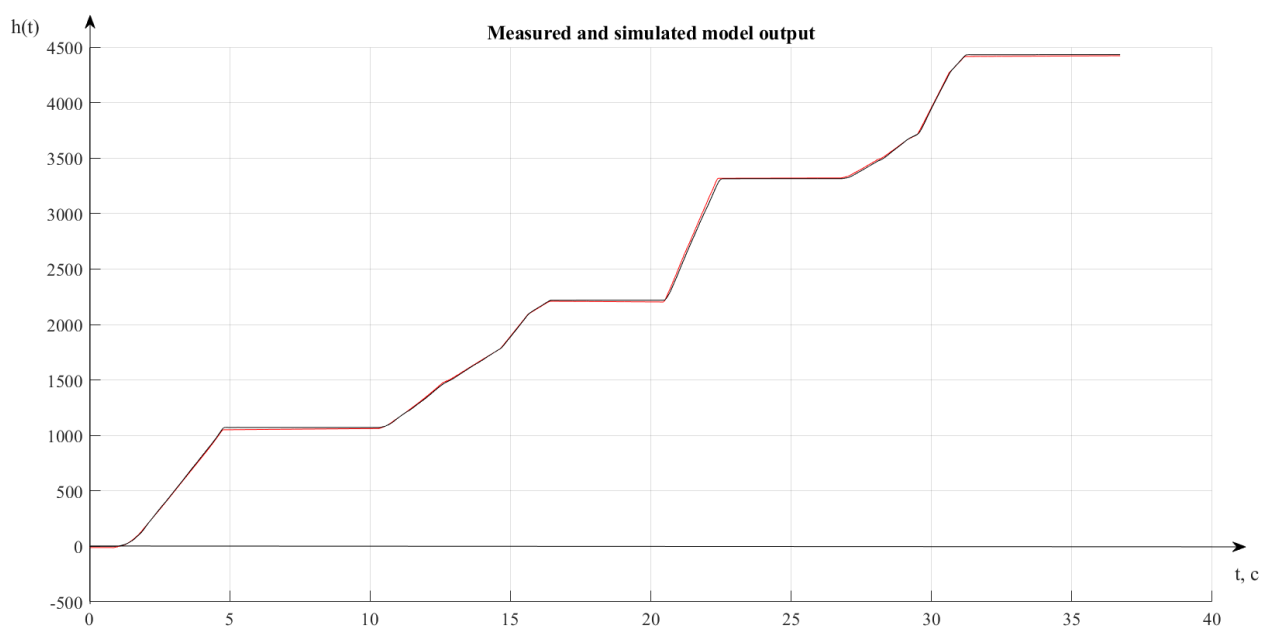


Рисунок 4.12 – Порівняння реакції еталонної та ідентифікованої систем на збурюючий вплив по «виходу 2»

За результатами ідентифікації видно, що отримана система у просторі станів дає точність 99,08% по «виходу 1» та 99,02% по «виходу 2», що зводиться до 99% загальної відповідності ідентифікованої системи – фізичній.

Запишемо модель робота у просторі станів, отриманого шляхом ідентифікації:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -2.39 \cdot 10^{-5} \\ 1 \cdot 10^{-5} & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1.43 \cdot 10^{-5} & 7.86 \cdot 10^{-6} \\ -1.31 \cdot 10^{-4} & 1.37 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1.43 \cdot 10^4 & 876.67 \\ -1.37 \cdot 10^4 & 1.51 \cdot 10^3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

5 РЕАЛІЗАЦІЯ СЛІДКУЮЧОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ LEGO NXT

Отримана у п. 4.2 модель у просторі дає змогу використовувати її у подальшому для реалізації на базі робота LEGO.

Основною ціллю даного розділу є, по-перше, перевірка основної ідеї магістерської дисертації та, по-друге, аналізу кількісних та якісних характеристик сліdkуючої системи на базі реального об'єкту.

Як зазначалося у п. 2.3, основною задачею сліdkуючої системи є утримання реального виходу біля бажаного, шляхом мінімізації похибки, оптимально за витратами енергії.

Бажаним входом у рамках магістерської дисертації доцільно обрати траєкторію, адже це одна із головних фізичних характеристик рухомих об'єктів.

З огляду на це, перш за все, потрібно розробити інструментарій, що дозволить формувати траєкторію та переводити її у функції бажаного виходу $z(t)$, зазначену у п. 2.3.

5.1 Веб-додаток формування маршруту

На рисунку 5.1 показано інтерфейс створеного веб-додатку, який допомагає знайти траєкторію між двома адресами. Основним елементом у створеному веб-додатку, є бібліотека Atlas Azure Maps.

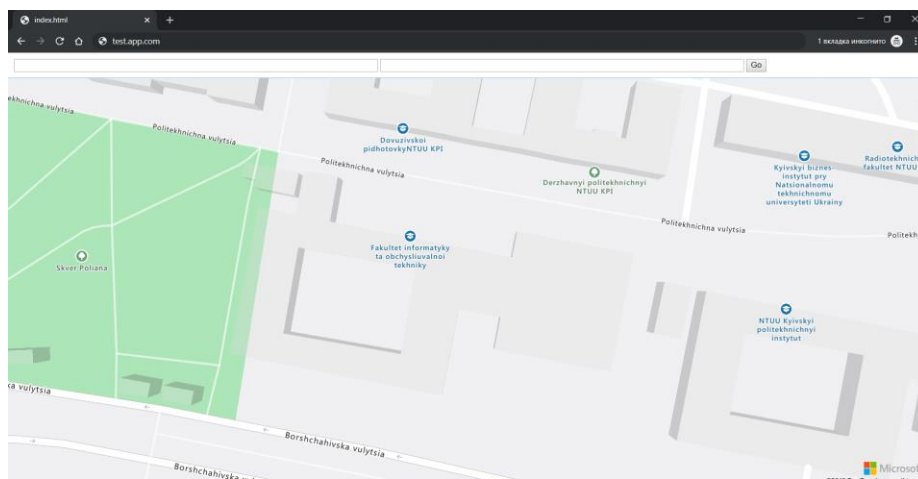


Рисунок 5.1 – Інтерфейс веб-додатку пошуку маршруту між двома адресами

Ця бібліотека надає API для отримання навігаційного шляху між двома точками за їх адресою.

У веб-додатку наявні два поля для введення та кнопка. Поля – відображають назву обраного, за допомогою кліку миші, місця на карті.

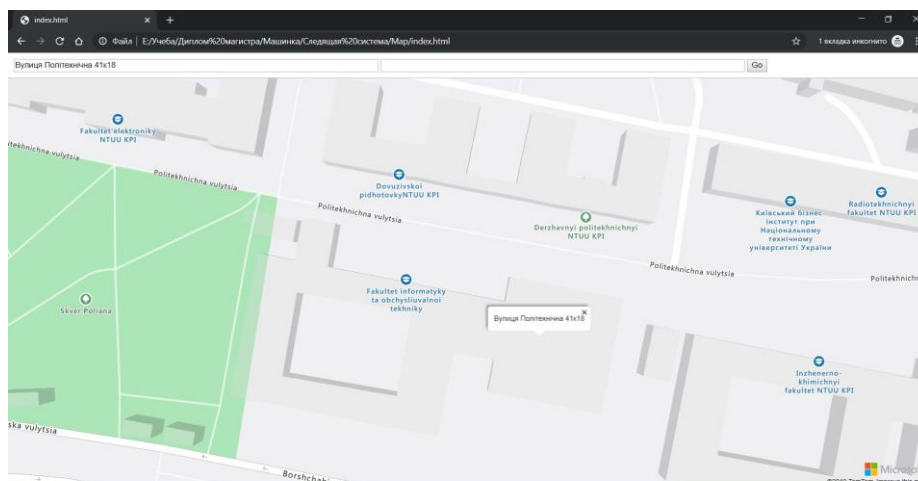


Рисунок 5.2 – Реакція веб-додатку на клік мишею по елементу на карті

Відповідним чином потрібно визначити початкову та кінцеву точки шляху та натиснути кнопку «GO».

Після успішного створення шляху веб-додаток зберігає набір точок (у форматі широта-довгота) у JSON-файл.

Наразі, отримані дані не відповідають тим форматам, котрі прийнятні для слідкуючої системи, описаної у п. 2.3.

Постає задача у розробці алгоритму переведення даних із формату довгота-широта у відповідні функції часу бажаного виходу слідкуючої системи.

5.2 Алгоритм конвертації довготи-широти у заданий вхідний вплив системи

Як зазначалося вище, вихід системи – зміна кута обертання кожного із моторів робота.

Отже, слідкуюча система повинна бути розроблена таким чином, щоб утримувати кути обертання коліс відповідно до заданих бажаних значень.

Відповідно, постає задача переходу від бажаної траєкторії, отриманої у п. 5.1, до бажаних кутів обертання коліс.

Звернемося до динаміки роботи. Визначимо математичні рівняння, що пов'язують зміну кута обертання колеса (мотора) та траєкторію руху робота.

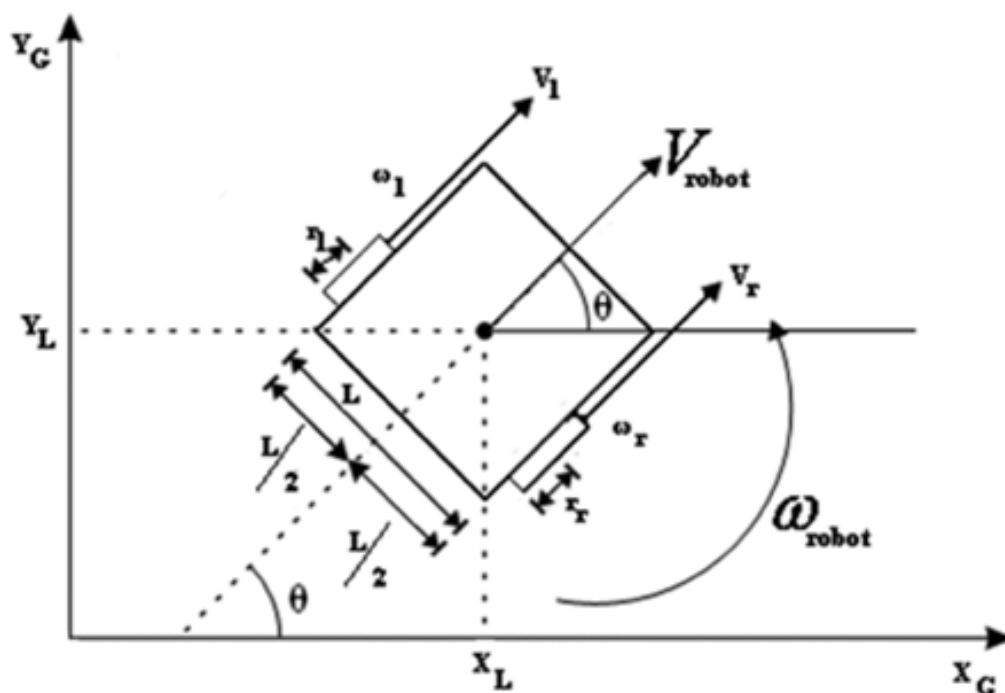


Рисунок 5.3 – Схематичне представлення динаміки руху робота

Пояснення рисунку 5.3 наведено у таблиці нижче 5.1.

Таблиця 5.1 – Перелік величин до рисунку 5.3

L	Ширина робота, см
r_r	Радіус правого колеса, см
r_l	Радіус лівого колеса, см
ω_r	Кутова швидкість правого колеса, рад/с
ω_l	Кутова швидкість лівого колеса, рад/с
V_r	Лінійна швидкість правого колеса, см/с
V_l	Лінійна швидкість лівого колеса, см/с
ω	Кутова швидкість робота, рад/с
V	Лінійна швидкість робота, см/с

Нехай φ – зміна кута повороту колеса робота. Із кінематики відомо, що кутова швидкість виражається наступним рівнянням:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

З огляду на те, що робот має два колеса, останнє рівняння справедливе для кожного із них

$$\omega_r = \frac{d\varphi_r}{dt},$$

$$\omega_l = \frac{d\varphi_l}{dt}.$$

Маючи обидві компоненти кутової швидкості для коліс, можна виразити загальну кутову швидкість робота

$$\omega = r \frac{\omega_r - \omega_l}{L},$$

за умови, що радіуси обох коліс однакові. Із тих же компонентів кутової швидкості можна виразити загальну лінійну швидкість робота:

$$V = r \frac{\omega_r + \omega_l}{2}.$$

Наразі можна виразити проекції швидкостей, на відповідні осі, через переміщення:

$$V_x = V \cos(\omega) = x,$$

$$V_y = V \sin(\omega) = y.$$

Тепер, коли динаміка руху робота описана, можна побудувати MATLAB скрипт, котрий дасть змогу перевести дані із формату довгота-широта у відповідні кути оберту коліс у кожний момент заданого кінцевого часу.

Додаток В містить приклад алгоритму конвертації даних із формату довгота-широта у функцію $z(t)$.

5.3 Експериментальні дослідження на базі LEGO NXT

За функцію $z(t)$, описану в п. 2.3, було обрано кути оберту коліс у кожний момент часу.

Для отримання відповідної функції було побудовано підсистему формування маршруту між двома адресами. Однак, дані, сформовані підсистемою, неможливо використати як функцію часу для слідкуючої системи. З огляду на це було розроблено MATLAB скрипт, що конвертує отримані підсистемою дані у відповідну функцію часу $z(t)$.

Наразі побудовані всі потрібні модулі, що дає можливість провести експерименти із порівняння витрат енергії трьома підходами:

- 1) оптимальна слідкуюча система на базі векторно-матричної моделі регулятора з невідомим вектором станів;
- 2) слідкуюча система на базі ПД-регулятора;
- 3) слідкуюча система на базі модального регулятора.

Для проведення експериментів, перш за все, потрібно визначитися із виглядом функції $z(t)$.

Нехай бажана траєкторія руху моделі матиме вигляд, як на рисунку 5.4.

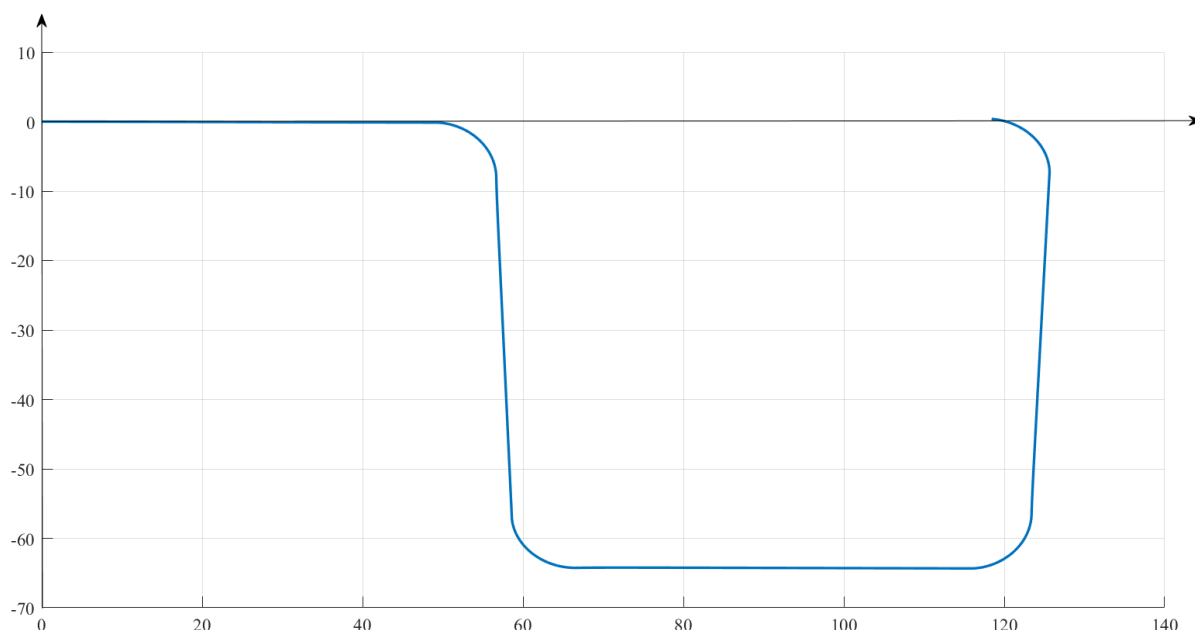


Рисунок 5.4 – Бажана траєкторія руху

Тепер, коли траєкторію сформовано веб-додатком, потрібно конвертувати її у відповідну функцію бажаних кутів обертання коліс у кожний момент часу.

Результат алгоритму наведено на рисунку 5.5.

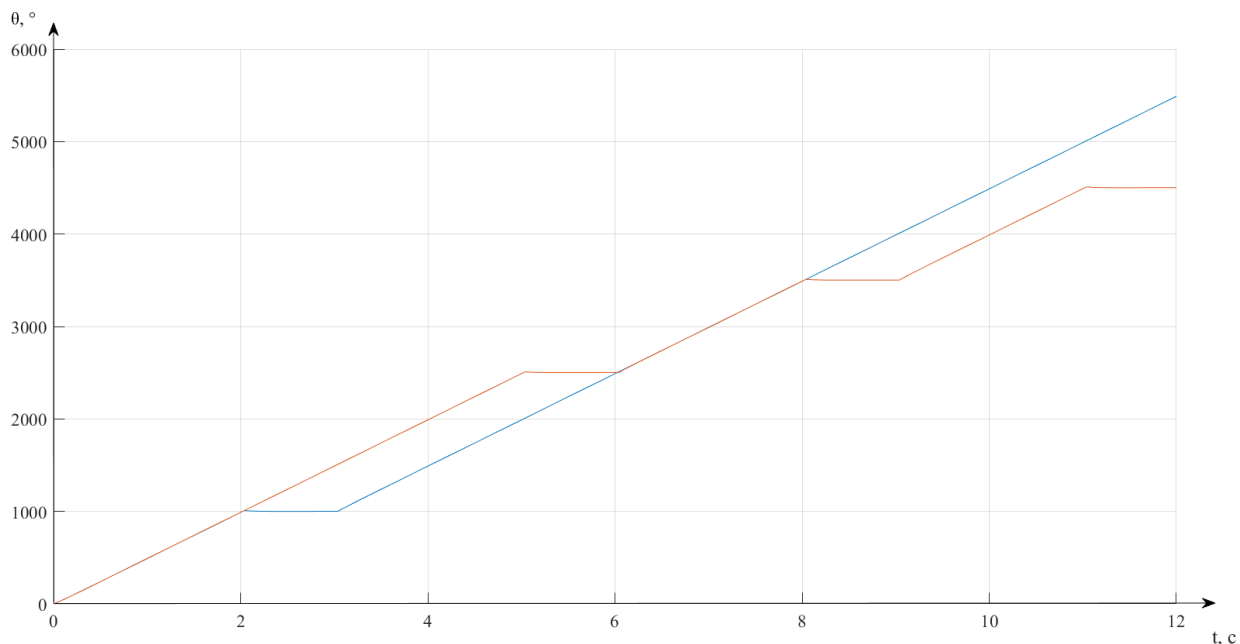


Рисунок 5.5 – Бажані кути обертання коліс

Тепер переходимо до аналізу отриманих результату кожним із підходів.

5.3.1 Оптимальна слідкуюча система на базі векторно-матричної моделі регулятора із невідомим вектором станів

Задача синтезу регулятора полягає в забезпеченні системі автоматичного управління бажаних динамічних характеристик.

На першому кроці синтезу цифрових систем з невідомим вектором станів виконується розрахунок регулятора будь-яким із відомих методів. В загальному випадку спочатку необхідно визначити матрицю \mathbf{K}_p зворотних зв'язків за станом, складність розрахунку якої полягає у виборі бажаних коренів характеристичного рівняння.

На наступному кроці для відновлення вектору станів необхідно побудувати спостерігаючий пристрій та визначити вигляд його матриць. Перш за все необхідно розрахувати матрицю \mathbf{H} коефіцієнтів зворотного зв'язку спостерігаючого пристрою.

Для знаходження коефіцієнтів матриці \mathbf{H} можна використовувати метод, який полягає в тому, щоб прирівняти значення при однакових степенях характеристичного поліному

$$[z\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{H}\mathbf{C}],$$

та бажаного характеристичного рівняння, де \mathbf{E} – одинична матриця розмірності $n \times n$, \mathbf{A}, \mathbf{C} – відповідні матриці об'єкту у просторі станів.

Спостерігаючий пристрій описується рівнянням стану:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{cn}(t) = \mathbf{A}_{cn}\mathbf{x}_{cn}(t) + \mathbf{B}_{cn}\mathbf{u}_{cn}(t), \\ \mathbf{y}_{cn}(t) = \mathbf{C}_{cn}\mathbf{x}_{cn}(t) + \mathbf{D}_{cn}\mathbf{u}_{cn}(t). \end{cases}$$

Матриці $\mathbf{A}_{cn}, \mathbf{B}_{cn}, \mathbf{C}_{cn}, \mathbf{D}_{cn}$ описуються наступними виразами:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{cn} = \mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}, \\ \mathbf{B}_{cn} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{H}], \\ \mathbf{C}_{cn} = -\mathbf{G}, \\ \mathbf{D}_{cn} = 0. \end{cases}$$

де $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ – відповідні матриці об'єкту у просторі станів.

Останнім кроком, після побудови спостерігаючого пристрою і відновленні невідомого вектору станів, можна приступати до розрахунку матриць, якими описується регулюючий пристрій.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p(t), \\ \mathbf{y}_p(t) = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{D}_p \mathbf{u}_p(t). \end{cases}$$

де матриці $\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p, \mathbf{D}_p$ описуються наступними виразами:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_p = [\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C} + \mathbf{B}\mathbf{G}], \\ \mathbf{B}_p = [\mathbf{B} \quad \mathbf{H}], \\ \mathbf{C}_p = -\mathbf{G}, \\ \mathbf{D}_p = [1 \quad 0 \quad \dots]. \end{cases}$$

де \mathbf{G} – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку за станами синтезованого регулятора.

На рисунку 5.6 показано побудовану, за допомогою Simulink, модель слідкуючої системи із векторно-матричною моделлю регулятора для проведення експериментів.

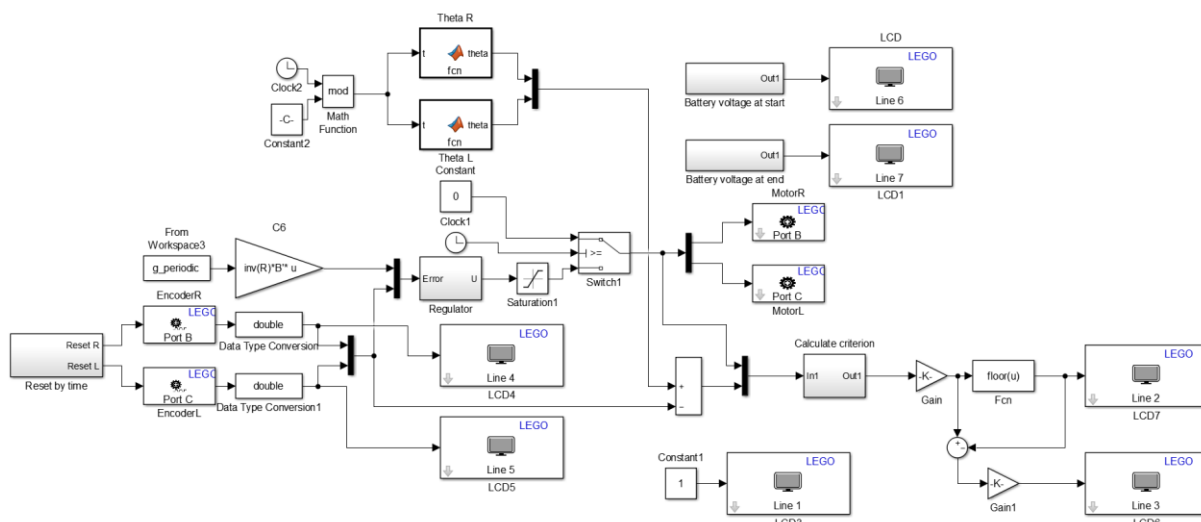


Рисунок 5.6 – Модель оптимальної слідкуючої системи із векторно-матричною моделлю регулятора на базі LEGO NXT

Модель побудована таким чином, щоб виводити значення напруги батареї на початку та в кінці роботи, на базі цих даних можливо розрахувати розряд батареї, що є якісною характеристикою системи.

Також, відбувається обрахунок значення критерію оптимальності, що є кількісною характеристикою слідкуючої системи.

Також, для порівняння даних, отриманих давачами робота, автор проводив заміри напруги вольтметром.

Результати експерименту зведемо у таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати експериментів слідкуючої системи із векторно-матричною моделлю регулятора

Вимір \ Час, с	0	70
Напруга (давачами), В	7.962	7.948
Напруга (вольтметром), В	8.01	7.95
Критерій	0	10 517 389 031

Математичний розрахунок показує, що використання слідкуючої системи із векторно-матричною моделлю регулятора призвело до:

- 1) 0.18% втрат заряду батареї на основі даних отриманих із давачів,
- 2) 0.37% втрат заряду батареї на основі даних отриманих вольтметром.

5.3.2 Слідкуюча система на базі ПІД-регулятора

ПІД-регулятор виробляє керуючий сигнал, що є сумою трьох складових: пропорційного регулювання, регулювання за інтегралом та регулювання за похідною від похибки. Алгоритм або функціональна залежність, відповідно до яких регулятор (керуючий пристрій) формує керуючий вплив $u(t)$ у цьому випадку буде мати вигляд:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

де K_p, K_i, K_d – відповідно коефіцієнти пропорційної, інтегральної і диференціальної складової закону регулювання або ПІД-регулятора.

На рисунку 5.7 показано побудовану, за допомогою Simulink, модель слідкуючої системи із ПІД-регулятором для проведення експериментів.

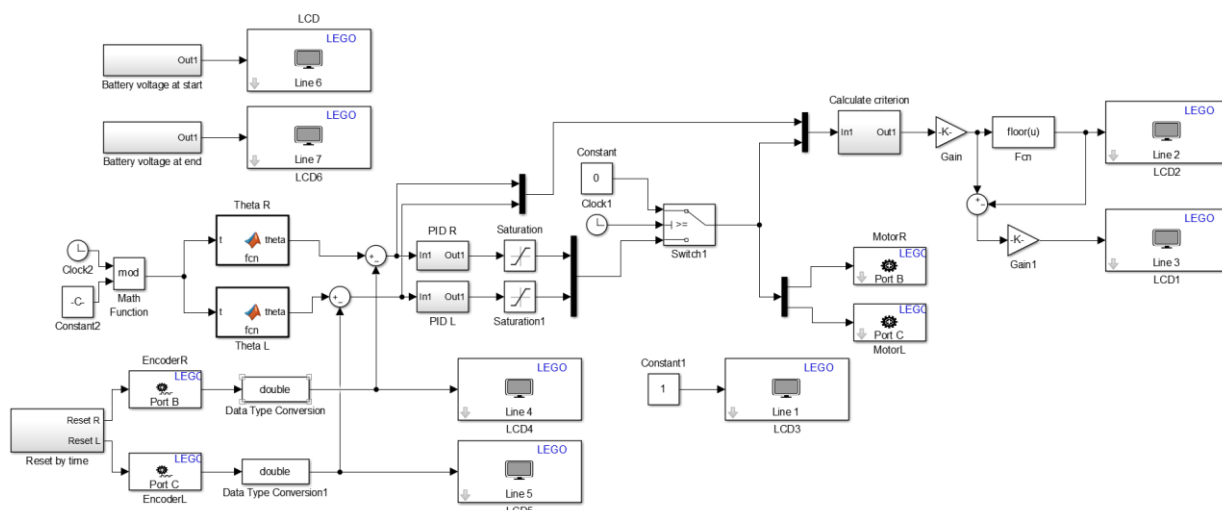


Рисунок 5.7 – Модель сліdkуючої системи із ПІД-регулятором на базі LEGO NXT

Результати експерименту зведемо у таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати експериментів сліdkуючої системи із ПІД-регулятором

Вимір \ Час, с	0	70
Напруга (давачами), В	7.990	7.904
Напруга (вольтметром), В	8.03	7.99
Критерій	0	11 221 126 975

Використання сліdkуючої системи із ПІД-регулятором призвело до:

- 1) 1.05% втрат заряду батареї на основі даних отриманих із давачів,
- 2) 0.5% втрат заряду батареї на основі даних отриманих вольтметром.

5.3.3 Сліdkуюча система на базі модального регулятора

Метод модального керування – метод формування ланцюгів зворотних зв'язків, що надають замкненій системі заздалегідь обраний розподіл коренів.

Регулятор, що приєднаний до об'єкта, отримує змінні стану об'єкта x_1, x_2, \dots, x_n як вхідні сигнали та виробляє керуючий вплив, що прикладається до об'єкта.

Вихідні сигнали регулятора можуть бути подані на об'єкт у тих самих точках, через які можуть подаватися вимірювані зовнішні впливи $V(t)$.

Тоді повний вплив на об'єкт матиме вигляд

$$u(t) = V(t) - Kx(t),$$

де K – матриця перетворення регулятора (коефіцієнтів зворотного зв'язку за станом).

Синтез модального регулятора полягає у знаходженні матриці K із такими значеннями k_1, k_2, \dots, k_n , щоб синтезована система задовольняла необхідним якісним показникам.

На рисунку 5.8 показано побудовану, за допомогою Simulink, модель слідкуючої системи із модальним регулятором для проведення експериментів.

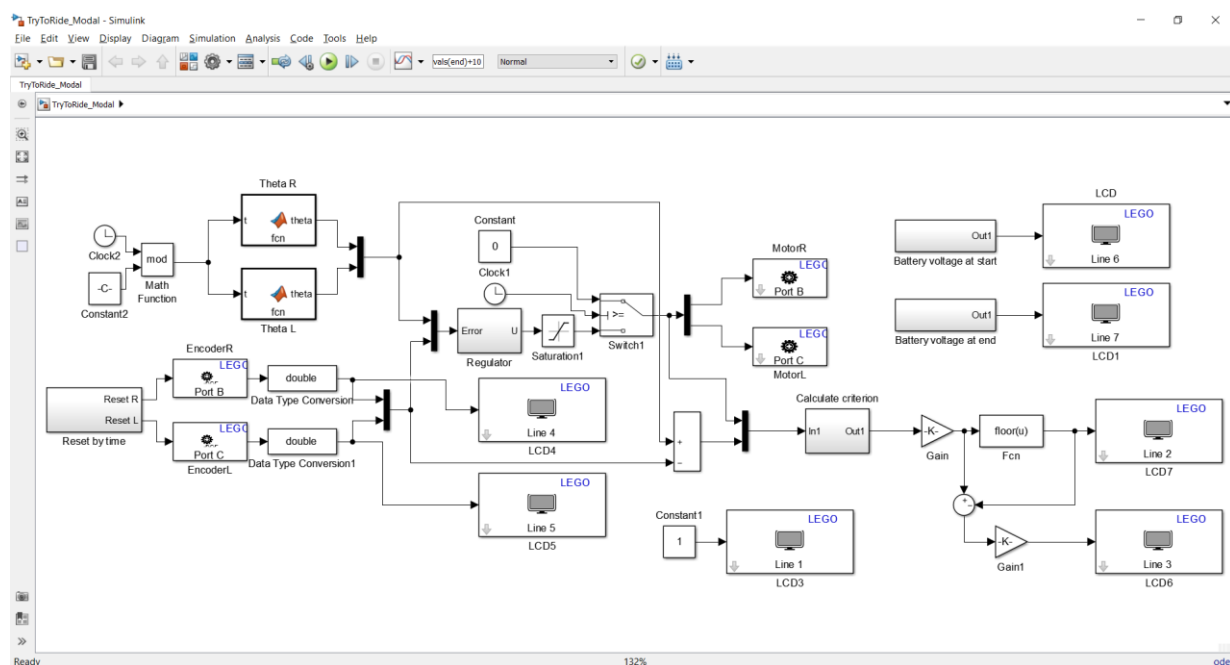


Рисунок 5.8 – Модель слідкуючої системи із модальним регулятором на базі LEGO NXT

Результати експерименту зведемо у таблицю 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати експериментів слідкуючої системи із модальним регулятором

Вимір \ Час, с	0	70
Напруга (давачами), В	7.948	7.865
Напруга (вольтметром), В	8.01	7.95
Критерій	0	606 229 227 600

Використання слідкуючої системи із модальним регулятором призвело до:

- 1) 1.05% втрат заряду батареї на основі даних отриманих із давачів,
- 2) 0.75% втрат заряду батареї на основі даних вольтметром.

5.4 Висновки

Отже, проведені експерименти дозволили накопичити кількісні і якісні характеристики кожного підходу до побудови слідкуючої системи.

З втратою заряду батареї близько $\frac{3}{4}$ відсотка та точністю проходження траєкторії менше третини, модальний регулятор виявився найгіршим підходом у цьому дослідженні. Його можна використовувати лише в тому випадку, якщо вартість реалізації є більш критичною, ніж точність у вирішенні завдань.

Результати показують, що використання ПД-регулятора може призвести до того, що втрата заряду батареї складе 0.5% за 70 секунд з точністю покриття траєкторії приблизно 80... 85%. Отже, ПД-регулятор розглядається як середина між вартістю та якістю.

Останнім підходом, який розглядався, була оптимальна слідкуюча система на базі векторно-матричної моделі регулятора. Значення втрати заряду акумулятора зафіксовано на рівні 0.37% та точність покриття траєкторії більше 99% дозволило з упевненістю стверджувати, що цей підхід є найкращим із розглянутих.

Результати експериментів на базі LEGO NXT наведено у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Результати усіх експериментів слідкуючої системи на базі LEGO NXT

Експеримент \ Вимір	Втрата заряду на основі даних вольтметра, %	Втрата заряду на основі даних із датчиків, %
Слідкуюча система	0.37	0.18
ПД-регулятор	0.5	1.05
Модальний регулятор	0.75	1.05

6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Вирішення логістичних проблеми за допомогою оптимальних слідкуючих систем буде використано як базисну модель для стартап проекту.

Задача, що буде вирішуватися, має динамічний характер. Вхідними даними буде інформація, котра надходить від окремих об'єктів логістичної системи. Рішенням буде, по-перше, система, побудована на основі IoT, та, по-друге, оптимальне, за витратами енергії, керування рухомими об'єктами даної системи. Ця система прогнозує виникнення негативних факторів та генерує керуючий вплив для їх нівелювання.

Задля визначення доцільності реалізації ідеї у стартап проекті, проведемо її опис даючи відповіді на наступні питання:

- 1) зміст ідеї (що пропонується);
- 2) можливі напрямки застосування;
- 3) основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- 4) чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

6.1 Опис ідеї стартап-проекту

У рамках даного підрозділу буде проведено опис ідеї стартап-проекту, як такої, що дасть цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів. Також буде проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів.

Отже, почнемо із опису самої ідеї стартап-проекту. Таблиця 6.1 наводить ідеї із зазначенням напрямків та вигоди застосування IoT моделі для вирішення логістичних проблем.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
	Моніторинг окремих вузлів усієї системи (рухомих чи нерухомих)	Дозволяє контролювати параметри рухомих чи нерухомих об'єктів системи, що призводить до оперативного реагування на зовнішні зміни
	Віддалений контроль кожного елементу	Можливість віддаленого налаштування окремих вузлів в залежності від поставлених задач
	Автоматизація усієї ланки поставок та/або мережі логістики.	Можливість слідування певним логістичним сценаріям, котрі незмінні та вважаються найкращими для певних вхідних параметрів

Наразі, первинний опис ідеї проведено. Загалом легко помітити, що система дає суттєві переваги у автоматизації та управлінні логістикою, загалом, та окремими елементами логістичної мережі, зокрема.

Перейдемо тепер до аналізу потенційних техніко-економічних переваг ідеї. По-перше, потрібно окреслити техніко-економічні властивості та характеристики ідеї. По-друге, визначити попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку. Та, по-третє, провести порівняльний аналіз слабких (W), аналогічних, (N) та сильних (S) сторін запропонованої реалізації.

Аналіз вищезазначених ознак зведено у таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Конкуре нт 1	Конкуре нт 2	Конкуре нт 3			
1.	Користувацький інтерфейс	Веб та мобільн ий додатки	Веб додаток	Десктоп -додаток	Мобільн ий додаток			+
2.	Стійкість до відмов	Стійкий	Стійкий	Стійкий	Стійкий		+	
3.	Децентралізація управління	+	–	–	–			+
4.	Використання моделі IoT або її складових	+	–	–	–			+
5.	Оптимальне планування маршруту	+	–	–	–			+
6.	Енергоефективн е керування рухомими об'єктами логістичної системи	+	–	–	–			+

Продовження таблиці 6.2

7.	Простота у реалізації	–	+	+	+	+		
8.	Можливість гнучкого масштабування із додаванням нових вузлів чи обчислювальних ресурсів на управління	+	–	–	–			+

Автор хоче також зазначити, що конкуренти та відповідні їх реалізації обмежувалися лише збором та аналізом інформації. Відсутня імплементація керування як такого. Наразі логістичні системи виступають скоріше посередником, між даними і користувачем, у той час, як запропонована автором концепція, навпаки, являє собою систему керування логістикою у повному сенсі.

З огляду на вищесказане та на аналіз сильних та слабких сторін запропонованої концепції, автор робить висновок, що реалізація управління логістичною системою на базі IoT цілком конкурентоспроможна.

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

З огляду на те, що у п. 6.1 автор дійшов висновку проте, що ідея цілком може бути конкурентоспроможна, доцільно провести огляд технологічної можливості втілення ідеї як такої.

У рамках даного підрозділу буде проведено аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз наступних складових:

- 1) технологія виготовлення товару згідно ідеї проекту;
- 2) наявність таких технологій, чи їх потрібно розробити/добробити;
- 3) доступність таких технології авторам проекту.

Результати аудиту зведені у таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
		Django	Наявна	Доступна, безкоштовна
		Ruby on Rails	Наявна	Доступна, безкоштовна
		ASP.NET	Наявна	Доступна, безкоштовна
		Swift	Наявна	Доступна, безкоштовна
		React Native	Наявна	Доступна, безкоштовна

Продовження таблиці 6.3

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
		Kotlin	Наявна	Доступна, безкоштовна
		Xamarin	Наявна	Доступна, безкоштовна
		Amazon Web Services	Наявна	Доступна, платна
		Microsoft Azure Web Services	Наявна	Доступна, платна
		Google Cloud	Наявна	Доступна, платна
		Alibaba Cloud	Наявна	Доступна, платна
		Cisco	Наявна	Доступна, платна
		Verizon	Наявна	Доступна, платна
		Qualcomm	Наявна	Доступна, платна
		AT&T	Наявна	Доступна, платна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: веб-додаток – ASP.NET, мобільний додаток – React Native, провайдер хмарних технологій – Microsoft Azure Web Services, провайдер комунікаційного обладнання – Cisco.				

Для розробки веб-додатку було обрано технологію ASP.NET, тому що автор та члени стартап-команди мають великий досвід розробки веб-додатків на базі цієї технології.

Для розробки мобільного додатку обрано технологію React Native, переваги поміж іншими – можливість розробки однієї кодової бази одразу для Android та IOS операційних систем.

Провайдером хмарних технологій обрано Microsoft Azure Web Services, з огляду на суттєвий досвід роботи команди із ним та малу, у порівнянні із іншими провайдерами, вартість послуг.

Провайдером комунікаційного обладнання обрано компанію Cisco, з огляду на її вагомий авторитет у галузі надання комунікаційних послуг.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У цьому підрозділі буде визначено: ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту, напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність, обсяг, динаміка розвитку. Таблиця 6.4 містить зведену інформацію аналізу попиту.

Таблиця 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	5
2.	Загальний обсяг продаж, грн / ум. од	250 000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутня

Продовження таблиці 6.4

5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	$ARR =$ $= \frac{21 \text{ млн} - 10,714 \text{ млн}}{75 \text{ млн}}$ $= 13,7$

Дані, із таблиці 6.4 свідчать про достатню привабливість ринку для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи. Результати оцінювання наведено у таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Потреба моніторингу та оперативного реагування, задля зменшення впливу негативних факторів, що виникають у	Логістичні компанії, компанії, що проводять моніторинг ланцюга поставок, онлайн платформи перевезення	Різні за масштабом системи, різні способи комунікації окремих вузлів системи, різні способи сповіщення у процесі моніторинг	Стійкість до відмов, оперативне автоматичне реагування на зовнішні фактори на базі наперед визначених

	логістичних процесах	вантажів, компанії, що займаються доставками вантажів		наборів правил та/або сценаріїв
--	-------------------------	---	--	------------------------------------

Наразі, після визначення потенційних груп клієнтів переходимо до аналізу ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприятимуть ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджатимуть (таблиці №№ 6.6 – 6.7).

Таблиця 6.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Велика собівартість продукції	Собівартість готової системи може бути доволі неприйнятною для кінцевого споживача, не дивлячись на переваги у використанні продукту	1) Політика знижок 2) Різні пакети послуг для різних потреб клієнтів 3) Можливість безоплатного користування всім набором послуг на певний період

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зацікавленість у продукті великими логістичними компаніями	Для логістичних гігантів видатки на вирішення ситуацій у логістичних процесах – дорожче, аніж превентивне запобігання останнім	1) При виході на ринок, робити ставку на логістичних гігантів та компанії, що тісно пов'язані із логістикою

Після проведення аналізу факторів загроз та можливостей, переходимо до аналізу пропозиції, а саме: визначимо загальні риси конкуренції на ринку. Результати аналізу наведені у таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста	Існує декілька конкурентів, одні займаються моніторингом, інші – управлінням, а не і тим, і іншим	Врахувати недоліки конкурентів на ранніх етапах маркетингового дослідження.

Продовження таблиці 6.8

2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Замовники можуть бути із різних країн	Врахувати законодавство кожної із країн-замовників, задля адекватної роботи системи моніторингу та реакції на зовнішні процеси
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Технологічні рішення використовуються лише для логістичних потреб	Розробити систему таким чином, щоб надати можливість контролю чи моніторингу за процесами/об'єктами, що дотично пов'язані із логістикою
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Предметна область залишається незмінною, шляхи вирішення проблем змінюються	Розробити систему таким чином, щоб недоліки конкурентів перетворити у свої переваги

Продовження таблиці 6.8

5. За характером конкурентних переваг - цінова	Надання інструментарію для оперативного реагування на зміни у логістичних процесах	Використання відповідних технологій, задля забезпечення моніторингу та реакції на логістичні процеси за, попередньо налаштованими, сценаріями
6. За інтенсивністю - не марочна	Відсутність авторитетних компаній, що давно займаються цим питанням	Створити власний бренд, котрий, у подальшому, можна розвинути і на інші галузі ІТ чи економіки.

Проведений аналіз конкуренції, дає широке розуміння того, який стан конкуренції на обраному ринку логістичних послуг. Результати показують, що конкуренція є чистою, що дозволить знайти свого споживача, котрого зацікавить підхід вирішення проблем, що виникають у логістичних процесах, на базі попередньо сформованих правил та/або сценаріїв у середовищі IoT. Тепер проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у обраній галузі за М. Портером.

Результати аналізу зведені у таблицю 6.9.

Таблиця 6.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки:	Існує декілька конкурентів, основною ціллю котрих є вирішення логістичних проблем тільки з одного боку і аж ніяк не комплексно вирішення проблем	Конкуренти присутні і уже доволі давно надають свої послуги на ринку логістичних застосунків, але це не перешкоджає виходу на ринок	Постачальників, як таких немає, через те, що конкуренти використовують лише засоби розробки ПЗ, а не інтеграції пристроїв	Для кінцевого користувача буде цікавим те, що система може сама приймати рішення, опираючись на певну базу правил, що попередньо наповнена розробником, чи самим клієнтом	Ціна, що не може бути порівнянна, з огляду на те, що конкуренти надають засоби вирішення логістичних проблем у вузькому спектрі, без використання пристроїв-давачів інформації

За результатами аналізу, робимо висновок, щодо можливості роботи на ринку, з огляду на конкурентну ситуацію. Також сильні сторони, дають перевагу у конкурентоспроможності на ринку. Але висновок все ще не повний, з огляду на те, що не проведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

На основі попереднього аналізу конкуренції (таблиця 6.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (таблиця 6.2), вимог споживачів до товару (таблиця 6.5) та факторів маркетингового середовища (таблиці №№ 6.6 – 6.7) обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз зведено у таблицю 6.10.

Таблиця 6.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Можливість моніторингу окремих вузлів логістичної системи	Наразі, логістичні компанії мають потребу у інструментах моніторингу стану окремих вузлів своїх логістичних екосистем, задля подальшого віддаленого чи автоматичного керування останніми, у разі виникнення позаштатних ситуацій

Продовження таблиці 6.10

2.	Можливість оперативного реагування на зовнішні фактори, що так чи інакше впливають на роботу логістичної системи	Можливість автоматичного прийняття рішень окремими компонентами логістичної системи, дає широкі можливості для забезпечення QoS на достатньому рівні, без суттєвих бюджетних витрат на це
3.	Можливість легкого налаштування нового компоненту логістичної системи із базового набору	Уведення нового елементу у систему без суттєвих часових затрат на це – дає суттєві переваги поміж конкурентами.

Визначені фактори конкурентоспроможності (таблиці 6.10) дають змогу провести аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Результати аналізу зведено у таблиці 6.11.

Таблиця 6.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розроблювальною системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Можливість моніторингу окремих вузлів логістичної системи	20	+						

Продовження таблиці 6.11

2.	Можливість оперативного реагування на зовнішні фактори, що так чи інакше впливають на роботу логістичної системи	16		+					
3.	Можливість легкого налаштування нового компоненту логістичної системи із базового набору	17			+				

Заключним аналізом ринкових можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу на основі ринкових загроз та можливостей (таблиці №№ 6.6 – 6.7), та сильних і слабких сторін (таблиця 6.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

SWOT-аналіз стартап-проекту наведено у таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: можливість моніторингу та керування окремими вузлами логістичної системи, можливість легкого налаштування нового компоненту логістичної системи із базового набору	Слабкі сторони: простота у реалізації
Можливості: зацікавленість у продукті великими логістичними компаніями	Загрози: велика собівартість продукції

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативу ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. Також, оцінимо орієнтовний оптимальний час ринкової реалізації з огляду на конкурентів. Результати аналізу зведено у таблицю 6.13.

Таблиця 6.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання IoT моделі для моніторингу та керування окремими вузлами логістичної системи	90%	12 місяців
2.	Використання моделі «клієнт-сервер» для моніторингу та керування окремими вузлами логістичної системи	50%	18 місяців

Зрозуміло, що доцільно обрати першу альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту, з огляду на її вищу ймовірність отримання ресурсів та порівняно менші строки реалізації.

Отже, підводячи підсумок, автор визначив ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, що дасть змогу підвищити конкурентоспроможність розроблювального проекту поміж аналогами.

Також, проведено аналіз ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, на основі яких були виведені можливі реакції компанії розробника, задля зменшення фактору загроз або повного їх нівелювання у рамках ринкових відносин.

Обрано напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Тепер автор має можливість перейти до розробки ринкової стратегії стартап-проекту, як такого.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

У рамках даного підрозділу, автор проведе розробку ринкової стратегії. Першим кроком розроблення передбачено визначення стратегії охоплення ринку, опис цільових груп. Результати аналізу зведено у таблицю 6.14.

Таблиця 6.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Логістичні компанії	Компанії готові використовувати продукт, за умови зменшення затрат на технічний супровід впроваджуваної системи	Попит достатньо високий з огляду на те, що компанії зацікавлені у зменшенні щоденних затрат на оперативне реагування на зміни у логістичних процесах	Існують конкуренти, що впроваджують системи моніторингу за логістичними процесами	Доволі складно зайти у сегмент, адже великі логістичні компанії неохоче переходять зі старого на щось нове

Продовження таблиці 6.14

2.	Компанії, що займаються сферою доставок вантажів	Компанії готові використовувати продукт, за умови впровадження функціоналу сценаріїв автоматичного реагування на зміни, що відбуваються у логістичних процесах	Попит дуже високий, адже, основною складовою збитків є – несвоєчасна доставка вантажів, що виникає через відсутність оперативного реагування на фактори-завади	Існує декілька додатків, що допомагають проводити моніторинг доставки вантажів	Легко увійти у сегмент, так як відсутні перепони у готовності сприйняття продукту
Які цільові групи обрано: з огляду на аналітику, доцільно обрати 2 сегмент і орієнтуватися на компанії, котрі, так чи інакше, пов'язані із доставками вантажів.					

Провівши аналізу потенційних груп споживачів переходимо до визначення стратегії охоплення ринку:

- 1) концентрованого маркетингу;
- 2) диференційованого маркетингу;
- 3) масовий маркетинг.

Результати аналізу зведено у таблицю 6.15.

Таблиця 6.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Використання IoT моделі для моніторингу та керування окремими вузлами логістичної системи	Концентрован ий маркетинг	Гнучкість у використанні, децентралізація роботи системи у вузлах, стійкість до відмов	Стратегія диференціації

Обравши базову стратегію розвитку стартап-проекту, переходимо до вибору стратегії конкурентної поведінки. Визначення типу конкурентної поведінки зведено у таблицю 6.16.

Таблиця 6.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так	Пошук нових	Ні	Стратегія лідера

Наразі автор може перейти до визначення стратегії позиціонування, адже підґрунтя для цього створено. На основі вимог клієнтів до продукту (таблиця 6.5) та дивлячись на обрану диференціальну стратегію розвитку (таблиця 6.15) формуємо стратегію позиціонування, що наведено у таблиці 6.17.

Таблиця 6.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Оперативне реагування на зовнішні фактори на базі наперед визначених наборів правил або сценаріїв	Стратегія диференціації	Можливість моніторингу та керування окремими вузлами логістичної системи	Децентралізація, IoT, автоматичне реагування на зовнішні зміни у логістичних процесах

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару. Для цього у таблиці 6.18 буде підсумовано результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 6.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Можливість моніторингу окремих вузлів логістичної системи	Наразі, логістичні компанії мають потребу у інструментах моніторингу стану окремих вузлів своїх логістичних екосистем, зادля подальшого віддаленого чи автоматичного керування останніми, у разі виникнення позаштатних ситуацій	Наразі конкуренти зосереджуються тільки на моніторингу та зведені даних про стан вузлів логістичної системи без можливості віддаленого керування.

Продовження таблиці 6.18

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
2.	Можливість оперативного реагування на зовнішні фактори, що так чи інакше впливають на роботу логістичної системи	Можливість автоматичного прийняття рішень окремими компонентами логістичної системи, дає широкі можливості для забезпечення QoS на достатньому рівні, без суттєвих бюджетних витрат на це	Наразі, у розглянутих аналогах конкурентів, відсутня реалізація автоматичного реагування на негативні зовнішні зміни у логістичних процесах
3.	Можливість легкого налаштування нового компоненту логістичної системи із базового набору	Уведення нового елементу у систему без суттєвих часових затрат на це – дає суттєві переваги поміж конкурентами.	Даний функціонал взагалі відсутній, адже аналоги конкурентів не надають жодних інструментів для створення вузлів

Надалі розробимо маркетингова модель товару: остаточну ідею продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання. Маркетингова модель товару наведена у таблиці 6.19.

Таблиця 6.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Автоматичне реагування на негативні чинники, що виникають у процесі логістики		
	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Використання моделі IoT 2. Децентралізація управління 3. Простота у масштабуванні 4. Стійкість до відмов		
	Якість: стандарти регулювання якості моделей на базі IoT, нормативи узгодження компонентів моделей IoT		
	Пакування відсутнє		
	Організація: ILGOL, назва товару: E.Logistic Secure		
	До продажна підтримка – наявна, у вигляді консалтингу у обиранні моделі системи, в залежності від потреб замовника		
	Постійний супровід впроваджених систем після продажу		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенти, торгові марки			

Наступним кроком передбачено визначення цінової політик, що передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проводився експертним методом та зведений у таблицю 6.20.

Таблиця 6.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	150 000	207 000	12 000 000	Нижня: 195 000 Верхня: 205 000

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення:

1. проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників;
2. вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
3. вибір та обґрунтування виду посередників.

Результати визначення системи збуту зведено у таблицю 6.21.

Таблиця 6.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Обираючи модель системи, в залежності від потреб та цілей – формується “Pay-As-You-Go” система оплати за виділені ресурси	Продаж та маркетингове просування	0 (напрямую) 1 (через одного посередника)	Власна та через посередників

Останньою складовою маркетингової програми буде розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на обрану основу для позиціонування. Розроблення концепції наведено у таблиці 6.22.

Таблиця 6.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Пошук нових методів вирішення логістични х проблем	Інтернет	Децентралізаці я, модель IoT, стійкість до відмов, наявність віддаленого керування окремими вузлами логістичної системи, моніторинг та оперативне реагування на негативні зміни у логістичних процесах	Показати переваги системи перед аналогами, навести неспростовні докази того, що використання системи призводить до суттєвих бюджетних заощаджень	Докладний аналіз бюджетних статей видатків, середньої за розмірами, логістичної компанії на вирішення щоденних логістичних проблем, із подальшим порівнянням із використанням моделі IoT для вирішення зазначених проблем

6.6 Висновки

У рамках даного розділу було проведено маркетинговий аналіз стартап-проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. Проведення маркетингового аналізу передбачало виконання наступних кроків:

- 1) опис ідеї проекту (товару, послуги, технології);
- 2) технологічний аудит ідеї проекту;
- 3) аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту;
- 4) аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту;
- 5) розроблення маркетингової програми стартап-проекту.

Проведений опис ідеї стартап-проекту, як такої, надав цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї дозволив зрозуміти, чим стартап-проект відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Проведений аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею проекту, дав можливість відповісти на низку питань, пов'язаних із технологічними аспектами реалізації стартап-проекту:

- 1) технологія виготовлення товару згідно ідеї проекту;
- 2) наявність таких технологій, чи їх потрібно розробити/додати;
- 3) доступність таких технологій авторам проекту.

Наступним кроком розробки стартап-проекту було визначення:

- 1) ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту;
- 2) ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту;
- 3) напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища;
- 4) потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Відповіді на ці питання дали змогу сформулювати потенційні можливості виходу стартап-проекту на ринок, чи доцільно взагалі запускати стартап-проект та чи буде запропонована ідея цікава цільовій аудиторії.

Найважливішим етапом аналізу даного питання, було формування SWOT-аналізу.

Логічним продовженням розробки стартап-проекту було розроблення його ринкової стратегії. Перш за все було проаналізовано групи потенційних споживачів, котрі будуть зацікавлені використовувати реалізацію, запропоновану автором.

За результатами аналізу потенційних користувачів аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) автор ідеї обрав цільові групи, для яких він пропонуватиме свій товар, та визначив стратегію охоплення ринку – з огляду на те, що компанії буде зосереджуватися на одному сегменті, обрано стратегію концентрованого маркетингу.

Останнім питанням було розроблення маркетингової програми стартап-проекту. Автор вважає, що саме це питання дасть змогу потенційним інвесторам зрозуміти переваги впровадження ідеї у ринку. Визначення ключових переваг концепції товару, меж встановлення ціни, формування системи збуту та концепції маркетингових комунікацій дало змогу остаточно зрозуміти можливість запуску запропонованого стартап-проекту.

Узагальнюючи проведений аналіз, автор констатує:

- 1) з огляду на наявний попит, динаміка ринку та рентабельність роботи на ринку – можливість ринкової комерціалізації, безумовно, існує;
- 2) з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції та конкурентоспроможність проекту – перспективи впровадження доволі високі;
- 3) подальша імплементація є доцільною.

7 ВИСНОВКИ

Метою магістерської дисертації ставилося – збільшення запасу ходу транспортних засобів на електричній тязі, за рахунок використання оптимальних, за витратою енергії, систем керування.

Задля досягнення мети, автор провів огляд стану справ у предметній області, що дозволило більш детально зрозуміти, які є актуальні проблеми із електричними транспортними засобами. Проаналізувавши висновки, автор дійшов висновку, що найважливішою проблемою є – малий запас ходу ЕТЗ.

Оптимальним рішенням даної проблеми, на думку автора, є використання оптимальних, за витратою енергії, систем керування. Теоретичні засади даного розділу теорії управління тісно пов'язані із, так званим, аналітичним конструюванням оптимальних регуляторів (АКОР). Найбільшим відомими задачами цього підходу є:

- 1) стабілізація станів системи;
- 2) стабілізація виходу системи;
- 3) слідкуюча система.

Розглянувши ці три задачі, автор дійшов висновку, що, для досягнення мети магістерської дисертації, потрібно використовувати саме 3 задачу АКОР. Вибір був обраний з огляду на те, що слідкуюча система дасть змогу мінімізувати похибку між бажаним та реальним виходами системи керування, витрачаючи на це мінімальну кількість енергії.

Наступним питанням, що постало перед автором, стала перевірка доцільності використання слідкуючих систем різними об'єктами керування, на предмет поліпшення якісних характеристик останніх.

Результати, зібрані автором, дали чітке розуміння того, що слідкуюча система, по-перше, не залежить від об'єкту керування та, по-друге, дійсно зменшує використання енергії при виконанні поставлених задач.

Логічним кроком у подальшому дослідженні була реалізація слідкуючої система у рухомому об'єкті. У рамках даної магістерської дисертації було обрано

робот LEGO NXT. Живлення від електричного акумулятора – основна причина вибору його, як об'єкту для досліджень.

Зібрані дані із давачів робота дозволили автору відобразити фізичну модель у вигляді моделі простору-станів, що є звичною для теорії автоматичного керування. Ідентифікована система дозволила побудувати адекватну модель у MATLAB/Simulink. Із допомогою стандартних інструментів MATLAB/Simulink, автору вдалося завантажити побудовану систему безпосередньо у робота LEGO NXT, замінивши при цьому ідентифіковану модель на реальний фізичний об'єкт.

Задачею, що ставилась перед слідкуючою системою, був рух за певною, заздалегідь сформованою, траєкторією. Отримані результати експериментів повністю виправдовують обраний підхід, як такий, що зменшує витрати енергії на виконання задачі руху за траєкторією.

Апробація результатів використання оптимальних слідкуючих систем, для зменшення витрат енергії, впроваджено на VII міжнародній науково-практичній конференції Winter InfoCom Advanced Solutions 2018, м. Київ.

Було проведено дослідження стартап-проекту за різними показниками, оцінено можливість виходу на ринок, можливі перешкоди впровадження та виділено ключові переваги продукту, стан та тип конкуренції. На основі аналізу було зроблено висновок про доцільність подальшої імплементації проекту.

Отже, використання оптимальних слідкуючих систем може бути використаний задля мінімізації витрат енергії рухомими об'єктами.

СПСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Двигун внутрішнього згоряння [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD%D0%B2%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D1%96%D1%88%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B7%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8F
2. HOV-lane [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL : https://en.wikipedia.org/wiki/High-occupancy_vehicle_lane.
3. Instructions For LEGO 9797 Mindstorms Education Base Set [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL : http://www.brickinstructions.com/lego_instructions/set/9797/Mindstorms_Education_Base_Set.
4. ROBOTC IDE [Електронний ресурс] / ROBOTC // ROBOTC. Режим доступу: URL : <http://www.robotc.net>.
5. Create linear and nonlinear dynamic system models from measured input-output data [Електронний ресурс] / MathWorks // MathWorks. Режим доступу: URL: <https://www.mathworks.com/products/sysid.html>.
6. MIMO models [Електронний ресурс] / MathWorks // MathWorks. Режим доступу: URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/mimo-state-space-models.html>.
7. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.
8. Дрейпер, У. Стартапы : профессиональные игры Кремниевой долины / У. Дрейпер ; предисл. Э. Шмидта ; пер. с англ. В. Егорова. – Москва : Эксмо, 2012. – 378 с.

9. Коэн, Д. Стартап в Сети : мастер-классы успешных предпринимателей / Д. Коэн, Б Фелд ; пер. с англ. М. Иутина. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 337 с.
10. Маллинс, Дж. Поиск бизнес-модели : как спасти стартап, вовремя сменив план / Дж. Маллинс, Р. Комисар ; пер. с англ. М. Пуксант и Е. Бакушевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 329 с.
11. CO2 emissions from cars: facts and figures (infographics) [Электронный ресурс]. / European Parliament // EU. – 2019. Режим доступа: URL: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>.
12. Compare EVs: Guide To Range, Specs, Pricing & More. [Электронный ресурс]. / М .Kane // Insideevs – 2019. Режим доступа: URL: <https://insideevs.com/reviews/344001/compare-evs>.
13. Rupp M. Contribution of country-specific electricity mix and charging time to environmental impact of battery electric vehicles: A case study of electric buses in Germany [Text] / Rupp M., Handschuh N., Rieke C., Kuperjans I // Applied Energy. – 2019. – Vol. 237. – P. 618–634. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.059.
14. Liua Y. Research on a multi-objective hierarchical prediction energy management strategy for range extended fuel cell vehicles [Text] / Liua Y., Lia J., Chen Z., Qin D., Zhang Y // Journal of Power Sources – 2019. – Vol. 429. – P. 55–66. doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.118
15. Yan L. Sharing economy to improve routing for urban logistics distribution using electric vehicles [Text] / Yan L., Ming K. L., Yingshuang T., Sir Yee L., Ming-Lang T // Resources, Conservation and Recycling – 2020. – Vol. 153. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104585.
16. Tranab D. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies [Text] / Tranab D., Majid V., Mohamed El B., Ricardo B., Joeri Van M. Omar H. // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2019. doi: 10.1016/j.rser.2019.109596.

17. Madhusudhanan A. K. A method to improve an electric vehicle's range: Efficient Cruise Control [Text] / Madhusudhanan A. K. // European Journal of Control – 2019. – P. 83-96. doi: 10.1016/j.ejcon.2018.12.006.
18. Hongwen H. Energy optimization of electric vehicle's acceleration process based on reinforcement learning [Text] / Hongwen H., Jianfei C., Xing C // Journal of Cleaner Production – 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119302.
19. Lisa K. Dynamic traffic information for electric vehicles as a basis for energy-efficient routing [Text] / Lisa K., Klaus B. // Transportation Research Procedia – 2019. – P. 457 – 464. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.218.
20. A brief workshop on Simulink Support for Project Based Learning with LEGO MINDSTORMS NXT. [Электронный ресурс] / MathWorks / MathWorks – 2013. Режим доступа: URL: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/campaigns/portals/files/project-based-learning/workshop-manual-r2014a.pdf>.

Додаток А – Публікації

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗМІСТУ ОСВІТИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

WINTER INFOCOM ADVANCED SOLUTIONS 2018

МАТЕРІАЛИ

**VII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

З ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

CONFERENCE PROCEEDINGS

7th SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

КИЇВ, УКРАЇНА

1-2 грудня 2018 року

ЗМІСТ/CONTENTS

Інформаційні системи та технології / Information Systems and Technologies.....	9
Борисов О.	
Система контролю пішохідного переходу за умови неповних даних..	11
Головатенко І., Писаренко А.	
Система управління логістикою на основі моделі IoT.....	13
Клімов О., Писаренко А.	
Система автоматичного паркування автомобілів на базі технології інтернету речей.....	15
Кравець П., Прохоров Д.	
Система прогнозування фінансових ринків із використанням рекурентних нейромереж.....	17
Павловський В., Долина В.	
Система керування дорожнім рухом в місті.....	19
Блінніков Б., Писаренко А.	
Роботизований комплекс точкового оброблення гербіцидами сільськогосподарських угідь.....	21
Ременюк Д., Долина В.	
Системи локального позиціонування для управління транспортними засобами на гірському підприємстві.....	23
Кирилюк А., Долина В.	
Механізми боротьби з колізіями при використанні технології радіочастотної ідентифікації	25
Звіряка В., Долина В.	
Аналіз джерел альтернативного енергоживлення для тепличних господарств.....	27
Kharabet R., Pysarenko A.	
Information System for Household Goods Accounting.....	29
Poltorak V.	
Locators Field for Effective BCH code.....	31
Alhawawsha M.	
The Role and Challenges of E-government in Jordan and USA.....	33
Технології програмування / Programming technologies.....	35
Бачкала Б.	
Виявлення відхилень продуктивності додатків з мікросервісною архітектурою.....	37
Шевченко Р.	
Про імплементацію систем контекстних термів.....	41
Коваль Ю., Крак Ю.	
Покращення алгоритму факторизації натурального числа.....	43

Система управління логістикою на основі моделі IoT

Головатенко Ілля

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Київ, Україна

illyaholevatenko@gmail.com

Писаренко Андрій

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Київ, Україна

andrew.pisarenko@gmail.com

Анотація. В роботі запропоновано рішення для зменшення затримок доставки вантажів логістичними компаніями за рахунок створення системи управління на базі інтернету речей (IoT). Це дозволить децентралізувати управління логістикою та зменшити витрати на доставку. Архітектура запропонованої системи дозволить отримувати дані у режимі реального часу на будь-якій стадії логістичного процесу та використовувати їх для формування більш продуктивної логістики.

Ключові слова: логістика, своєчасна доставка, IoT, об'єкти логістичної системи, мінімізація збитків.

ВСТУП

За даними статистики, логістичні компанії втрачають значну частину своїх коштів саме від несвоєчасної доставки вантажу [1]. До несвоєчасної доставки також відноситься втрата вантажу при перевезенні. Наслідком цього є повторна відправка вантажу, що призводить до незапланованих витрат. Несвоєчасна доставка також спричиняє ще й іміджеві збитки логістичним компаніям, із огляду на те, що рівень довіри клієнта значно падає і вірогідність повторної співпраці значно зменшується.

Рис. 1 ілюструє, які проблеми викликають невдоволення клієнтів логістичних компаній.

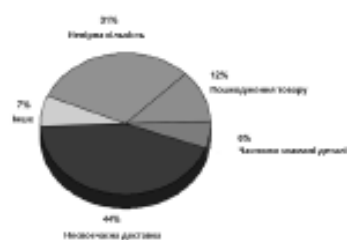


Рис. 1. Проблеми, що викликають невдоволення клієнтів логістичних компаній

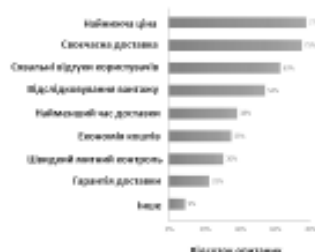


Рис. 2. Статистичні дані опитування компанії Carpgemini Consulting

Опитування, проведені компанією Carpgemini Consulting у 2017 році, на тему «Що найбільш важливе для перевізників?» [2], говорять про те, що 77% опитуваних концентрують увагу на зменшенні витрат на доставку. Також, 75% спеціалістів у логістиці кажуть, що найважливіше для них – це своєчасна доставка вантажу. Повні статистичні дані наведені на рис. 2.

Метою роботи є зменшення збитків логістичних компаній на доставку вантажів, за рахунок системи управління логістикою, на основі IoT.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Linbis Logistic – продукт американської компанії Linbis, що надає повний контроль над інвентаризацією з будь-якої точки світу через систему управління Warehouse Management (WMS). За допомогою панелей інструментів керування можна приймати обґрунтовані рішення, маючи повну інформацію про піковий сезон, пікові години, розподіл товарів у кожній області [3].

Logistic Software – продукт індійської компанії Harp Digital Solutions надає гнучкі функції для логістичних та кур'єрських веб-сайтів. Із його допомогою можна керувати логістичним бізнесом через Інтернет. Logistic Software поставляється з функціями миттєвого відстеження. Гнучкість програмного забезпечення дозволяє інтегруватися з існуючим логістичним веб-сайтом, мобільними програмами, тощо [4].

SuperProcure – продукт індійської компанії Superprocure дозволяє автоматизувати робочий процес логістичної компанії. Програмне забезпечення автоматизує ключові бізнес-процеси, такі як: транспортування морем, котирування та завершення розподілу відправлень. SuperProcure дозволяє автоматично керувати відправленнями, отримувати обґрунтовану ціну на послуги логістики [5].

ОСНОВНА КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ

Задача, що буде вирішуватися, має динамічний характер. Вихідними даними буде інформація, котра надходить від окремих об'єктів логістичної системи. Рішенням буде, по-перше, оптимальний маршрут, що мінімізує час доставки та, по-друге, система, побудована на основі IoT. Ця система прогнозує виникнення негативних факторів, котрі завадять своєчасній доставці та генерує керуючий вплив для їх нівелювання. Логістика розділяється на декілька складових: вантажі, об'єкти, що доставляють вантажі (вантажівки, морські судна, літаки, потяги),

місця, куди вантажі доставляються (кінцевий споживач, проміжний склад, пункт завантаження/розвантаження, порти, залізничні вузли).

Позначимо кожен із елементів. Об'єкти, що доставляють вантажі (ДВ), місця, куди вантажі доставляються (МД). Наразі, системи керування логістикою отримують інформацію про статус вантажу від МД. Що відбувається між окремими МД ці системи не відображають. У разі виникнення екстреної ситуації на маршруті ДВ система не буде відображати цю інформацію і не буде генерувати відповідного керуючого впливу, з метою оптимізації доставки вантажу.

Уведемо систему зв'язків у рамках даної системи: зв'язок «ДВ» – «МД», зв'язок «ДВ» – «ДВ», зв'язок «МД» – «МД», зв'язок «Система» – «МД» та зв'язок «Система» – «ДВ». Опишемо ці зв'язки. Наприклад (рис. 3): вантажівка отримала дані про стан на дорогах (затори, аварії та ін.). Проаналізувавши ці дані, вантажівка сама приймає рішення про зміну маршруту на новий, наприклад, оптимальний за витратою палива. Динамічна реакція на зміну зовнішнього середовища дозволить мінімізувати проблему несвочасності доставки вантажу.



Рис. 3. Приклад динамічного регулювання вантажівки на зовнішні зміни

Зміна маршруту фіксується у системі, що дозволяє відобразити оновлені дані в режимі реального часу. Для МД також стає доступна інформація про час прибуття ДВ. МД, отримавши інформацію про прибуття чергового ДВ, починає процес автоматичного виконання відповідних пунктів алгоритму оброблення вантажу. Автоматизовані пристрої можуть почати процес збору нового вантажу, для завантаження ДВ, чи, навпаки, підготуватися до розвантаження ДВ із подальшим завантаженням.

Так само МД може реагувати на відповідну інформацію від ДВ. Дана інформація відображає стан ДВ та орієнтовний час прибуття на МД, та робить запит на виконання певних дій по розвантаженню чи завантаженню (рис. 4).



Рис. 4. Приклад взаємодії вантажівки і складу

МД також мають можливість обмінюватися інформацією між собою. Це дозволить формувати запити на передачу вантажів між ними. Окремо

взятий МД має можливість сам прокладати маршрут ДВ (рис. 5).

ДВ обмінюються інформацією про ситуацію на маршруті для оперативного реагування і



Рис. 5. Приклад взаємодії між МД

генерування нового оптимального впливу у разі виникнення перешкод, які можуть суттєво вплинути на своєчасність доставки вантажу (рис. 6).



Рис. 6. Принцип обміну інформації між ДВ

Така горизонтальна, децентралізована структура надає ряд переваг, у порівнянні із вертикальною. По-перше, елементи системи не використовують одну точку доступу до інформації. Не потрібно проектувати систему на одному елементі, котрий повинен витримувати величезне навантаження. Можна кожному елементу надати функції головного, суттєво зменшивши навантаження на систему і ціну придбання ресурсів. По-друге, кожному елементу можна надати лише ті функції, котрі потрібні йому для ефективного виконання своєї роботи.

ВИСНОВКИ

Запропонована система дозволить вирішувати проблему несвочасності доставки вантажів, що суттєво зменшить збитки логістичних компаній. IoT, як фундамент системи, дасть змогу реагувати на форс-мажорні обставини у режимі реального часу та децентралізувати управління об'єктами логістики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Derick Gregory. Logistics Customer Service Strategy [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://slideplayer.com/slide/4664540/>.
2. John Langlely, Jr. The State of Logistics Outsourcing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://jda.com/-/media/jda/knowledge-center/thought-leadership>.
3. Linbis Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.capterra.com/p/161111/Linbis/>.
4. Xapp Digital Solutions. Logistic-Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.capterra.com/p/150277/Logistic-Software.
5. SuperProcure Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.capterra.com/p/164589/SuperProcure/>.

Додаток Б – Лістинг коду віддаленого керування

```
#include "JoystickDriver.c"

void forward(TJoystick joystick)
{
    motor[motorB] = -joystick.joy1_x2;
    motor[motorC] = -joystick.joy1_x2;
}

void backward(TJoystick joystick)
{
    motor[motorB] = -joystick.joy1_x2;
    motor[motorC] = -joystick.joy1_x2;
}

void rightPointTurn(TJoystick joystick)
{
    motor[motorB] = joystick.joy1_x2;
    motor[motorC] = -joystick.joy1_x2;
}

void leftPointTurn(TJoystick joystick)
{
    motor[motorB] = -joystick.joy1_x2;
    motor[motorC] = joystick.joy1_x2;
}

void rightSwingTurn(TJoystick joystick)
{

```

```

    motor[motorB] = -joystick.joy1_x2 / 2;
    motor[motorC] = -joystick.joy1_x2;
}

```

```

void leftSwingTurn(TJoystick joystick)
{
    motor[motorB] = -joystick.joy1_x2;
    motor[motorC] = -joystick.joy1_x2 / 2;
}

```

```

void fullStop()
{
    motor[motorB] = 0;
    motor[motorC] = 0;
}

```

```

task main()
{
    bHideDataFiles = false;
    nMaxDataFileSize = 1000;
    nMaxDataFiles = 100;
    datalogClear();

```

```

    while(true)
    {
        getJoystickSettings(joystick);

```

```

        if(joystick.joy1_x2 < 0 && joystick.joy1_TopHat == -1 && joystick.joy1_x1 <=
40 && joystick.joy1_x1 >= 10)
        {

```

```

        forward(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_x2 > 0 && joystick.joy1_TopHat == -1 && joystick.joy1_x1 <=
40 && joystick.joy1_x1 >= 10)
    {
        backward(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_TopHat == 2)
    {
        rightPointTurn(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_TopHat == 6)
    {
        leftPointTurn(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_x1 >= 40)
    {
        rightSwingTurn(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_x1 <= 10)
    {
        leftSwingTurn(joystick);
    }
    if(joystick.joy1_x2 == 0 && joystick.joy1_TopHat == -1 && joystick.joy1_x1 <=
40 && joystick.joy1_x1 >= 10)
    {
        fullStop();
    }
}
}
}

```

Додаток В – Лістинг MATLAB скрипту, формування функції $z(t)$

```
function [sThetaL, sThetaR] = findThetaFromXY(xy, t)

    x = xy(:, 1);
    y = xy(:, 2);
    time = linspace(0, t, length(x));

    theta(1) = 0;
    k = 2;
    thetaResult = [];
    thetaResult(1, :) = [0 0];

    while(k <= length(time))
        Vx = (x(k) - x(k-1)) / dT;
        Vy = (y(k) - y(k-1)) / dT;
        V = sqrt(Vx^2 + Vy^2);
        sinAlpha = Vy / V;
        cosAlpha = Vx / V;
        theta(k) = atan2(sinAlpha, cosAlpha);
        W = (theta(k) - theta(k-1)) / dT;
        W_R = (W * 1 + 2 * V) / (2 * r);
        W_L = (2 * V - W * 1) / (2 * r);
        thetaResult(k, 1) = ((W_R * dT * 180) / pi) + thetaResult(k-1, 1);
        thetaResult(k, 2) = ((W_L * dT * 180) / pi) + thetaResult(k-1, 2);
        k = k + 1;
    end

    sThetaR = spline(time, [0 thetaResult(:, 1)' 0]);
    sThetaL = spline(time, [0 thetaResult(:, 2)' 0]);
end
```